This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06260471 9

RARY

FACIT

lection.
n 1884.

BIBLIOTHÈQUE

DES MERVEILLES

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉDOUARD CHARTON

LES

FORCES PHYSIQUES

NEW-YORK

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

LES FORCES PHYSIQUES

PAR

ACHILLE CAZIN
PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU LYCÉE BONAPARTE

OUVRAGE ILLUSTRÉ DE 58 VIGNETTES
PAR A. JAMANDIER

PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET Cie
BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N° 77

1869

Droits de propriété et de traduction réservés.

LENOX LIBRARY
NEW YORK

INTRODUCTION

Un des plus nobles désirs de l'homme est celui de connaître les lois qui régissent l'univers, et ceux qui ont contribué à jeter quelque lumière sur ses mystérieuses harmonies ont toujours été entourés d'admiration; ils sont souvent apparus comme des êtres privilégiés, portant avec eux le flambeau divin, et à travers les siècles les générations contemplent leur œuvre indélébile et les placent au premier rang parmi les gloires de l'humanité. Jadis on les appelait *philosophes*, *amis de la sagesse*. Leurs spéculations embrassaient toutes les sciences. Pour eux le monde moral et le monde matériel étaient inséparables, et ils sondaient les mystères de l'âme aussi bien que ceux de la matière. L'accroissement rapide des connaissances humaines eut pour conséquence une subdivision dans la science, et un jour il fut impossible à l'esprit le plus vaste d'embrasser à la fois toutes les questions qu'avait fait naître successivement la contemplation de l'univers. Après les philosophes vinrent les savants, adonnés à des recherches spéciales, et aujourd'hui les principales branches de nos con-

naissances sont la philosophie proprement dite, traitant les questions de l'ordre moral et recherchant les principes essentiels des choses; les sciences physiques et mathématiques, consacrées aux lois du monde matériel et au développement des principes rationnels qui peuvent nous guider dans l'étude de la nature; les sciences naturelles, dont le rôle le plus important est de nous faire connaître les phénomènes qui se passent dans les êtres vivants.

Quelle que soit l'étude à laquelle se livre l'esprit humain, il y a certaines règles générales qu'il doit suivre, pour ne pas tomber dans de fâcheuses confusions. Lorsque ces règles ont été suivies, les recherches partielles peuvent être l'objet d'une synthèse, et les problèmes les plus élevés peuvent trouver dans cette synthèse les données nécessaires à leur solution.

Je me propose dans ce petit ouvrage d'initier les personnes qui, sans avoir les connaissances scientifiques approfondies, ont reçu une certaine culture intellectuelle, à quelques-unes des synthèses les plus remarquables auxquelles a conduit le progrès de la physique dans ces dernières années. L'ouvrage est consacré à la physique seulement, et, avant d'entrer dans mon sujet, je dois appeler l'attention du lecteur sur une règle essentielle qui doit être suivie dans l'étude de cette science.

En physique, on observe toutes les circonstances qui accompagnent un phénomène naturel; on mesure toutes les quantités accessibles à l'observation; on cherche une relation entre ces quantités, et cette relation s'appelle *la loi du phénomène!* Lorsque le phénomène est trop complexe, et qu'il semble impossible d'énoncer une loi unique, on modifie le phénomène à l'aide d'artifices; on fait alors une expérience. Certaines circonstances, qui

paraissent accessoires, sont rendues négligeables par la disposition de l'expérience, et l'on s'attache à observer celles qui prédominent. On obtient ainsi une loi approximative. Puis, le raisonnement aidant, on peut chercher ensuite l'influence des petites circonstances d'abord négligées; on voit dans quel sens elles altèrent la loi, et souvent on découvre la loi limite vers laquelle tend la loi observée, quand les circonstances accessoires deviennent de plus en plus négligeables. Une telle loi sert alors de principe fondamental; on la regarde comme l'expression provisoire d'une vérité physique; je dis provisoire, parce qu'il peut arriver qu'une observation mieux faite, ou l'observation d'un nouveau phénomène jusqu'alors inaperçu, vienne modifier les conclusions admises jusqu'alors.

Dans cette recherche, on ne doit apporter aucune idée préconçue, et il faut multiplier le même genre d'observations un grand nombre de fois. En prenant la moyenne de tous les résultats obtenus, on se met à l'abri des erreurs de mesure, qui sont dues inévitablement à l'imperfection de nos organes et à celle des instruments qu'on imagine pour leur venir en aide.

La physique rassemble toutes les lois expérimentales connues; elle les compare entre elles, et fait sortir de cette comparaison des lois plus générales. Elle n'a pas pour objet de trouver les causes intimes des phénomènes, de scruter la matière, pour en découvrir la nature; elle étudie l'attraction mutuelle des corps, la chaleur, la lumière, l'électricité, sans pénétrer le mystère de leur essence, laissant cette recherche à l'une des branches de la philosophie qu'on appelle *métaphysique*.

Les problèmes tels que ceux-ci : Qu'est-ce que la matière? Est-elle finie ou infinie? Y a-t-il dans l'espace des

portions vides et des portions pleines de matière? ne sont nullement du domaine de la physique. Elle fournit les données qu'on peut utiliser pour répondre à ces questions; mais ces données sont insuffisantes, et elles doivent être réunies à celles que nous fournissent les autres sciences pour concourir à la résolution du problème. C'est, sans doute, parce que cette règle n'a pas été suivie, que certains savants sont tombés à diverses époques dans les plus étranges erreurs, et que de nos jours encore la vieille lutte des matérialistes et des spiritualistes semble renaître. La physique est bien innocente de toutes ces discordes, et je fais des vœux pour que le petit ouvrage que j'offre au public contribue à rendre à cette science, aux yeux de tous, son véritable caractère.

LES

FORCES PHYSIQUES

CHAPITRE PREMIER

LES CORPS ET LES FORCES

I. Les trois états des corps. — Les molécules.

Nous appelons *corps* des portions de l'étendue que nous pouvons voir et toucher. Leur présence nous est d'abord révélée par toutes les sensations qu'ils produisent en nous; puis à mesure que notre éducation se fait, nous n'avons plus besoin du concours de toutes nos sensations, et souvent une seule suffit pour que nous reconnaissions la présence d'un corps en un lieu déterminé.

Nous étendons la main et nous éprouvons une résistance qui l'arrête; en même temps, le toucher nous révèle certaines particularités, telles que la

dureté, la continuité, la chaleur, la froideur ; nous concluons de là la présence d'un corps *solide*. Si le toucher est différemment affecté, si l'obstacle a une mobilité particulière, nous disons que le corps est *liquide*. Pendant longtemps l'homme n'a pas connu d'autres corps, parce que son éducation était incomplète. Puis, une observation plus attentive lui a appris à distinguer les corps *gazeux*.

Si nous étions habitués à vivre dans l'eau, le toucher suffirait pour nous révéler l'existence des gaz. Car dès que notre main sortirait de l'eau, nous éprouverions une sensation que nous attribuerions à un corps infiniment plus subtil que l'eau, capable d'être chaud ou froid, d'avoir un goût, une odeur. Il suffirait pour cela que notre main entrât dans l'atmosphère, chargée par exemple d'ammoniaque.

Plus tard, l'homme a reconnu qu'un même corps solide peut devenir liquide et gazeux. Le volum de gaz qu'un corps solide ou liquide peut produire est beaucoup plus grand que celui de ce corps. On est ainsi conduit à regarder les corps comme des assemblages de particules semblables dans le même corps, et qui peuvent se rapprocher ou s'éloigner les unes des autres. On appelle *molécules* ces subdivisions des corps, et, bien qu'il soit impossible de les voir isolément, même en aidant la vue des instruments les plus délicats, on ne peut douter de leur existence, parce qu'on arrive à la même conception en comparant entre elles toutes les observations.

On ne peut pas dire que la molécule soit démontrée avec une certitude absolue. Mais aucune des connaissances que nous acquérons en faisant usage de nos sens ne présente cette certitude, et c'est une règle essentielle en physique qu'une conception née dans notre esprit, d'après certaines données expérimentales, doit être acceptée, si elle n'est en désaccord avec aucun fait connu. C'est dans ce sens que nous devons entendre l'expression : *vérité physique*.

II. Impénétrabilité des corps. — Porosité. — Le vide barométrique. — La résistance magnétique.

Les corps ont des caractères communs que les observations les plus simples nous font connaître.

Deux corps ne peuvent occuper la même portion de l'étendue. Si certains faits semblent contraires à cette assertion, c'est qu'on ne les a pas observés avec assez de soin, et des expériences convenables lèvent bientôt tous les doutes.

Ainsi, vous posez un morceau de sucre sur une goutte d'eau, celle-ci disparaît rapidement ; l'aspect du sucre change, et vous dites que le sucre a absorbé l'eau. Il ne serait pas exact de dire que le sucre et l'eau occupent la même place. Le sucre est un assemblage de petites parties de forme prismatique, enchevêtrées les unes dans les autres, et ne formant pas un tout continu. Il y a des inter-

stices entre ces parties, de sorte que le volume réel du morceau est plus petit que son volume apparent : l'eau s'est introduite dans ces interstices. Vous pouvez diminuer l'étendue des interstices par la compression, et la quantité d'eau qui pourra l'imbiber sera moindre qu'auparavant. Vous pouvez faire fondre ce sucre en le chauffant ; il deviendra le sucre d'orge, et son volume apparent sera encore plus petit ; cette fois, il ne pourra plus s'imbiber d'eau.

Un grand nombre de corps présentent de semblables interstices ; on les appelle *pores*, et les pénétrations que l'on croit souvent observer ne sont qu'apparentes. On admet donc l'*impénétrabilité* des corps.

Ce caractère nous conduit à ne pas confondre avec les corps certaines portions de l'étendue qui affectent nos sens. L'ombre que le soleil projette derrière un corps est une portion d'étendue qui affecte notre vue d'une manière spéciale ; mais elle n'est pas impénétrable, et par suite elle n'est pas un corps.

Voici un autre exemple d'un espace qui offre le même caractère. Il nous est fourni par la célèbre expérience de Torricelli qui a conduit à l'invention du baromètre.

On prend un tube de verre d'un mètre environ de longueur, ouvert par un bout, fermé par l'autre ; on le remplit de mercure, et on le fait chauffer pour chasser l'air adhérent au verre et au mercure.

Quand le tube est refroidi, on le ferme avec le doigt, et on le renverse sur une cuve de mercure. Dès qu'on retire le doigt, la colonne de mercure

Fig. 1. — Expérience de Torricelli.

descend dans le tube et s'établit à une hauteur de 76 centimètres environ (fig. 1).

Dans quel état se trouve la portion du tube située au-dessus du mercure?

Lorsqu'on incline le tube, l'étendue de cette portion diminue; elle finit par disparaître, et on entend au même instant le choc du mercure contre le sommet du tube. Lorsqu'on redresse le tube, la portion vide de mercure reparaît, et le niveau se rétablit au même point que précédemment. Cette portion, qu'on appelle *le vide barométrique*, affecte notre vue comme le fait un corps gazeux, mais elle est pénétrable; aussi ne faut-il pas la regarder comme un corps. Si la plus petite bulle d'air était restée dans le tube, au sommet de la colonne mercurielle, elle ne disparaîtrait pas après l'inclinaison du tube; elle ne pourrait pas être pénétrée par le mercure. Aussi, bien qu'elle nous offre la même transparence que le vide barométrique, nous la classons parmi les corps.

Les phénomènes qu'on étudie en chimie nous offrent un grand nombre d'exemples de pénétration apparente. Mais, étant déjà habitués à concevoir les molécules, nous nous figurons aisément leur passage entre les interstices excessivement petits des corps, bien que ces interstices soient invisibles et qu'ils soient disposés tout autrement que les pores. Nous verrons plus tard que les interstices moléculaires diffèrent considérablement des pores par leur régularité et leur configuration, qui est particulière à chaque sorte de corps.

Je citerai encore un exemple de pénétrabilité. Approchez la main des extrémités d'un fort aimant : vous n'éprouverez aucune sensation particulière.

Mais tenez à la main un second aimant, et cherchez à l'approcher du premier, en mettant en regard les extrémités qui sont désignées par les mêmes lettres (fig. 2). Vous éprouverez une résistance comme si un corps visqueux était interposé entre les deux aimants. En conclurez-vous qu'un pareil corps existe? Non, parce que vous pouvez introduire entre les deux aimants des corps quelconques, à l'exclu-

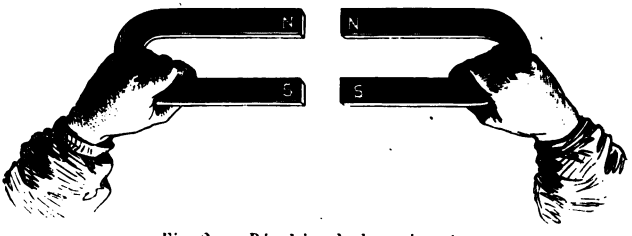

Fig. 2. — Répulsion de deux aimants.

sion du fer, sans vous apercevoir du moindre changement dans la résistance.

Il ne faut pas attribuer à l'air l'effet observé; car, bien que l'expérience se fasse dans l'air, pour plus de commodité, on pourrait en répéter une semblable avec un appareil dans lequel on aurait fait le vide barométrique entre les deux aimants. L'espace qui est le lieu de la *résistance magnétique* n'est donc pas impénétrable; ce n'est pas un corps.

III. Mobilité. — Inertie. — Force.

Les corps sont susceptibles de changer de position dans l'espace. La *mobilité* est un de leurs caractères, qui nous est révélé par l'observation. Les uns peuvent exécuter des mouvements indépendants de ceux des corps voisins ; ce sont les êtres vivants. Nous possédons en nous-mêmes cette faculté et nous la reconnaissons dans les animaux. Les autres corps sont privés de cette faculté et semblent avoir entre eux certaines relations mutuelles ; quand nous voyons l'un d'eux se déplacer, nous trouvons, après une éducation suffisante, qu'un autre éprouve un déplacement corrélatif. Nous ne reconnaissons plus dans ces corps la faculté de se mouvoir d'eux-mêmes.

Après avoir analysé toutes les observations, nous les résumons en distinguant les êtres vivants et les corps bruts, et nous formulons une de leurs différences fondamentales en disant que *les corps bruts sont inertes, ne pouvant se déplacer d'eux-mêmes et ne pouvant rentrer d'eux-mêmes au repos.*

Nous ajouterons donc l'*inertie* aux caractères précédents pour déterminer ce que nous entendons par un *corps*.

De ce qu'un corps en repos ne peut entrer de lui-même en mouvement, nous concluons que la cause du mouvement est extérieure à ce corps, et nous appelons *force* cette cause.

C'est dans ce sens très-général qu'on prend le mot force en physique, et la comparaison des phénomènes nous conduit ensuite à distinguer diverses espèces de forces, en ajoutant au mot force une épithète qui la qualifie. C'est ainsi que nous disons la force gravifique (pesanteur et attraction universelle), la force électrique, la force calorique, etc. Nous indiquons par cette classification que plusieurs phénomènes sont produits par le mouvement des corps ou de leurs molécules, sous l'influence d'une même cause, et, en réalité, nous ne faisons guère qu'une classification des phénomènes eux-mêmes.

Quelle est l'essence même de la force? La réponse à cette question n'est pas du domaine de la physique. Pour la résoudre, il ne suffit pas de s'appuyer sur les faits observés dans les corps seulement. La connaissance de ces faits est certainement indispensable, mais nous devons y joindre la connaissance de tout ce que l'intelligence humaine a pu découvrir dans l'ordre moral. La force, en effet, joue un rôle important dans les êtres vivants. Nous l'y trouvons sans cesse en rapport avec la vie, avec la matière, et on est obligé de reconnaître que sa recherche est liée aux plus hautes questions de la philosophie.

Nous chercherons, dans les chapitres suivants, à classer les forces, à donner leurs caractères distinctifs et à lier par elles les phénomènes physiques Nous pourrons examiner ensuite quelles don-

nées la physique fournit à la philosophie. Les erreurs qui ont été souvent commises dans l'interprétation des phénomènes nous apparaîtront aisément, et nous serons préparés, je l'espère, à entreprendre la lecture d'ouvrages spéciaux, où ces questions sont plus approfondies.

Je ne sais si je me fais illusion sur la phase intellectuelle que nous traversons aujourd'hui ; mais il me semble que les ouvrages modernes, tels que ceux de M. Hirn, dans lesquels j'ai puisé l'idée de ce petit livre, attestent hautement que le goût des spéculations de la pensée n'est pas altéré par les tendances positives que beaucoup de personnes voient avec terreur envahir notre société. Nous devons sans doute à la nécessité des études spéciales, conséquence de l'incroyable développement des connaissances humaines, les écarts d'imagination qui sont le résultat d'une culture superficielle des sciences, et qui passent trop facilement pour des vérités aux yeux de quelques-uns. Il appartient aux savants dont les vues sont plus étendues, d'apporter le remède en vulgarisant le plus possible les vérités scientifiques, en les rendant accessibles à tous ceux qui ont reçu quelque instruction. Les clameurs qui viennent quelquefois troubler le calme de l'étude ne peuvent qu'exciter la diffusion des sciences, et de cette diffusion doit résulter l'union de toutes les pensées qui ennoblissent l'humanité.

CHAPITRE II

L'ATTRACTION UNIVERSELLE

I. Les lois de Galilée et de Képler.

Le jour d'un des plus grands triomphes de l'esprit humain fut celui où il découvrit que la même force fait tomber une pierre sur la terre et graviter les corps célestes. C'est la comparaison des lois de la chute des corps terrestres et de celles du mouvement des astres qui a conduit Newton à cette loi admirable, et l'on conçoit avec quelle passion ses défenseurs luttent aujourd'hui, pour lui conserver intacte toute sa gloire, en présence de documents qui attribuent à notre célèbre Pascal la découverte de l'attraction universelle. Ce procès, dont on ne saurait prévoir l'issue, sera un des plus célèbres dans les annales de la science, et son importance est en raison de celle de la découverte.

Vers l'année 1590, Galilée trouvait à Pise la loi de

la chute d'un corps à la surface de la terre; traduite en nombres, cette loi nous apprend que le corps parcourt $4^m,9$ dans la première seconde, un chemin triple dans la deuxième, quintuple dans la troisième, etc. Trente ans plus tard, Képler, astronome de l'empereur d'Allemagne, comparant entre elles toutes les observations astronomiques faites antérieurement sur les planètes, trouvait qu'elles décrivent des orbites elliptiques autour du soleil, situé à l'un des foyers; il énonçait une relation numérique faisant connaître la rapidité de leur mouvement; il les comparait entre elles et découvrait la loi qui lie leurs masses et les durées de leurs révolutions. Képler procédait dans ces recherches comme le physicien qui observe un phénomène naturel. Il avait appris à lire dans le grand livre de la nature, livre toujours ouvert, et dans lequel sont écrites dans un style sublime les louanges du Créateur. Aussi quel éblouissement le jour où il lui fut donné de comprendre ce qu'il essayait de déchiffrer depuis de longues années!

« Depuis huit mois, dit-il dans ses *Harmonies du Monde*, livre V, j'ai vu le premier rayon de lumière; depuis trois mois j'ai vu le jour; enfin, depuis peu de jours j'ai vu le soleil de la plus admirable contemplation. Rien ne me retient; je me livre à la sainte fureur qui m'inspire; je veux insulter aux mortels par l'aveu ingénu que j'ai dérobé les vases d'or des Egyptiens pour en construire à mon dieu un tabernacle loin des confins de l'Egypte. Si vous

me pardonnez, je m'en réjouirai ; si vous m'en faites un reproche, je le supporterai. Le sort en est jeté : j'écris mon livre ; il sera lu par l'âge présent ou par la postérité ; peu importe ; il pourra attendre un siècle son lecteur ; Dieu n'a-t-il pas attendu six mille ans un contemplateur de ses œuvres[1] ! »

Ce langage peut nous étonner aujourd'hui ; mais l'état des esprits à l'époque où écrivait Képler justifie son exaltation ; grâce à Dieu, les régions de la science sont aujourd'hui plus sereines et les savants n'ont plus à lutter contre les superstitions qu'enfantait autrefois l'ignorance.

II. La loi de Newton.

Soixante ans plus tard Newton, professeur à Cambridge, expliqua les lois de Képler d'après les principes de la mécanique rationnelle[2]. La lune gravite autour de la terre, comme la terre gravite autour du soleil ; nous pouvons donc prendre son mouvement comme exemple de raisonnement. Ce mouvement est le même que si la lune, ayant reçu une certaine impulsion initiale dans une direction quelconque, était sollicitée à tomber sur la terre. C'est une impulsion originelle qui la retient dans son orbite, et si l'effet de cette impulsion pouvait

[1] *Essai sur Képler*, par M. Trouessart. Niort, 1867.
[2] *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687.

cesser tout à coup, notre satellite se précipiterait vers nous en parcourant $1^{mm},36$ dans la première seconde de chute. Or, imaginez une pierre élevée à une hauteur égale à la distance de la lune à la terre, et abandonnée à la pesanteur ; elle parcourrait justement $1^{mm},36$ dans la première seconde. Evidemment la cause de la chute des corps terrestres et celle de la gravitation de la lune autour de la terre sont les mêmes.

On exprime simplement un fait observé, quand on dit que la terre attire les corps. Le mot attraction indique un genre particulier de phénomène, sans qu'il implique aucune notion de sa cause intime. Nous disons semblablement qu'il y a attraction entre la lune et la terre ; puis, comme la gravitation de la terre et des planètes autour du soleil suit la même loi, nous disons qu'il y a attraction entre le soleil et ces corps.

On est ainsi conduit à une loi générale, applicable à tous les corps de l'univers, et établissant une harmonie entre leurs mouvements. C'est cette loi de *la gravitation universelle* qui immortalisera le nom de Newton. Essayons d'en saisir le sens le plus général.

Lorsqu'un corps est tiré du repos, le mouvement qu'il prend est plus ou moins rapide. Si le corps parcourt toujours le même espace en une seconde, le mouvement est uniforme ; si l'espace parcouru est de plus en plus grand, le mouvement est accéléré; si cet espace est de plus en plus petit, le mou-

vement est retardé. Supposons que le mouvement s'opère suivant une ligne droite. Dans le premier cas, le mouvement ne subissant aucune modification, le corps obéit seulement à la loi d'inertie, et nous n'avons à nous occuper d'aucune force extérieure qui le sollicite. Dans le second cas, il y a une *force accélératrice*, ou *puissance ;* dans le troisième, il y a une *force retardatrice* ou *résistance*. En employant ces mots, nous cédons à notre bon sens qui se refuse à admettre qu'un effet puisse exister sans cause.

Nous pouvons mesurer la grandeur de l'effet, et évidemment le nombre qui mesurera cet effet représentera très-bien dans notre esprit la grandeur de la puissance ou de la résistance. C'est à l'aide de deux quantités que ce nombre est obtenu ; l'une est la *masse* du corps, l'autre est la *vitesse*.

L'intelligence de ces mots est d'une telle importance que je prie le lecteur de suivre courageusement l'explication que je vais en donner, sans en redouter les difficultés.

Quel est le sens du mot *masse* d'un corps ?

Il est évident que la réunion de deux corps identiques A, A constitue un corps unique B dont la masse est double de celle de chacun d'eux ; si celle de A est 1, celle de B sera 2. Supposons que le corps B de masse 2 soit réduit à un volume 2 fois moindre : il est évident que sa masse n'aura pas changé; il constituera un nouveau corps C de même volume que le corps A, mais de masse double.

Nous concevons maintenant qu'un corps quelconque ait une masse, dépendant de son volume et du degré de condensation de ses molécules, et que cette masse puisse se représenter par un nombre, quand on aura pris pour unité la masse d'un corps déterminé, et qu'on aura trouvé le rapport de ces deux masses.

Quel est le sens du mot *vitesse* ?

Quand un corps se meut uniformément, sa vitesse est le chemin qu'il parcourt dans une unité de temps. Quand le mouvement n'est pas uniforme, on peut imaginer qu'à un instant donné le corps cesse d'être soumis à la force extérieure qui l'empêchait de se mouvoir uniformément, et alors, en vertu de l'inertie, le corps continuera à se mouvoir en ligne droite, uniformément. La vitesse de ce mouvement idéal est justement ce qu'on appelle la *vitesse* du corps à l'instant considéré! Cette vitesse s'accroît lorsque le corps est sollicité par une puissance; elle décroît lorsque le corps surmonte une résistance.

A l'aide de ces notions très-simples, il est aisé de comprendre la loi de la gravitation.

Une sphère A de masse 2, et une autre sphère B, de masse 3 par exemple, se meuvent l'une vers l'autre, suivant la droite qui joint leurs centres. Si la cause de leur mouvement est la gravitation, ou attraction newtonienne, la vitesse du corps A s'accroîtra pendant un instant très-court d'une quantité que je représenterai par 3; alors celle

du corps B se sera accrue pendant le même temps d'une quantité représentée par 2.

Tel est l'effet de la gravitation, qu'on peut appeler la *loi des masses*.

On voit que, pour nos deux sphères, le produit de la masse par l'accroissement de la vitesse est le même nombre 6 ; ce nombre mesure l'effet de l'attraction, et par conséquent l'intensité de la force qui produit le mouvement.

Quand nous considérons la sphère A, nous attribuons son mouvement à l'action de la sphère B, et *vice versa*, nous attribuons le mouvement de cette dernière à la réaction de la sphère A. Newton a appelé cette conséquence du raisonnement, *le principe de l'action et de la réaction*. En réalité, il est l'expression d'une vérité physique.

A mesure que les deux sphères se rapprochent l'une de l'autre, l'accroissement que subit la vitesse de chacune d'elles dans le même instant très-court, devient de plus en plus grand. Quand la distance des sphères est devenue 2, 3, 4 fois plus petite, cet accroissement de vitesse est pour chaque sphère 4, 9, 16 fois plus grande. Ces rapports numériques établissent la *loi des distances*.

En généralisant les considérations précédentes, on est convenu, en mécanique, en astronomie, en physique, d'appeler *force* le nombre qu'on obtient en multipliant la masse d'un corps par l'accroissement de la vitesse dans un temps infiniment petit, et divisant le produit par la valeur de ce temps.

Nous ne pouvons entrer ici dans aucun détail sur ce calcul ; il nous suffit de savoir que la force ainsi définie est une expression mathématique, imaginée pour faciliter l'intelligence de certains phénomènes, tels que les mouvements des corps célestes.

Et, en effet, complétant la notion de la force de gravitation, Newton démontre que les lois de Képler sont des conséquences rationnelles d'une impulsion originelle et de la formule mathématique suivante : la force de gravitation qui est relative à deux sphères quelconques est *proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance de leurs centres*. Une masse 2 attirant une masse 3 à la distance 1, la force pourra se représenter par 6 ; mais si la distance devient $\frac{1}{2}$, la force sera 4 fois plus grande, etc.

Cette formule renferme la loi des accroissements de vitesse que nous indiquions plus haut. Elle est donc, comme le principe de *l'action* et de *la réaction*, l'expression d'une vérité physique.

Voilà, en quelques mots, le sens de la grande découverte de Newton ; elle est une magnifique synthèse, résumant toutes les observations astronomiques accumulées pendant plusieurs siècles.

Newton n'a point cherché quelle était la cause intime de l'attraction, quelle était l'essence de la force qui la produisait ; il est resté mathématicien, et par suite son œuvre, dégagée de toute obscurité métaphysique, est impérissable. Elle n'est en oppo-

sition avec aucune doctrine philosophique, et elle a satisfait si complétement l'esprit humain, que depuis Newton les astronomes ne cherchent guère à remonter plus haut dans l'échelle des causes, à pénétrer le lien mystérieux qui unit ainsi deux corps quelconques de l'univers. On n'a pas tenté de se figurer ce lien; on n'a pas inventé de fluides capables d'entraîner dans leurs mouvements les corps l'un vers l'autre, ou si des théories de ce genre ont été tentées, elles sont restées isolées et sont tombées dans l'oubli. Nous verrons qu'il n'en a pas été de même des autres forces.

III. Comment on pèse les corps célestes.

Pour qu'une loi physique soit acceptable, il faut que toutes ses conséquences soient vérifiées par l'expérience. La loi de Newton conduit à une conséquence assez simple pour qu'on puisse en essayer la vérification. Deux corps terrestres, soustraits par quelque artifice à l'action de la pesanteur, doivent se précipiter l'un sur l'autre, d'autant plus vivement qu'ils sont plus massifs et plus voisins. Cette expérience, conçue par John Michell, en Angleterre, a été faite en 1798 par Cavendish. On ne peut soustraire un corps à l'action de la pesanteur, mais on peut le disposer de manière que la pesanteur ne lui imprime aucun mouvement.

Deux balles de plomb, pesant chacune 729 gram-

mes, sont adaptées aux extrémités d'un levier horizontal, suspendu par son centre à l'aide d'un fil très-fin (fig. 3).

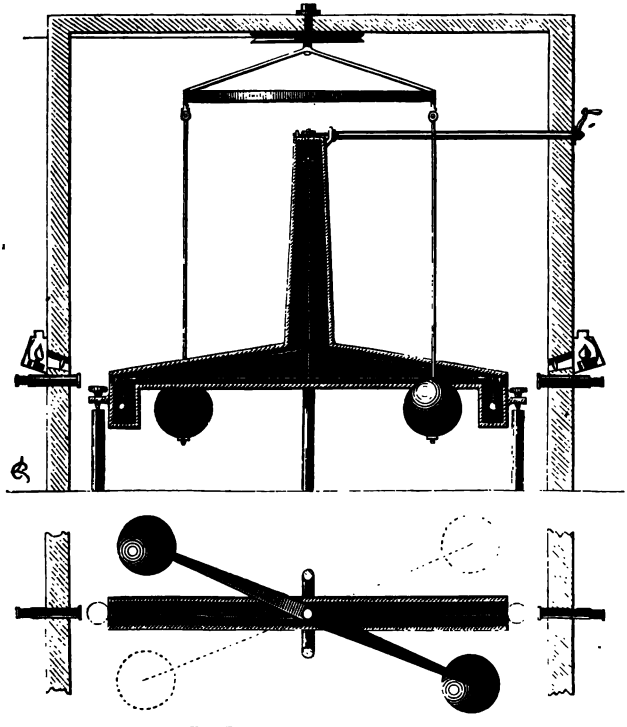

Fig. 3. — Appareil de Cavendish.

Il est évident que la pesanteur ne peut déplacer ces balles dans le sens horizontal. Deux grosses sphères de plomb, pesant chacune 158 kilogrammes,

sont placées à côté des précédentes ; la ligne de leurs centres rencontre le prolongement du fil de suspension, et les centres des balles et des sphères sont dans un même plan horizontal. Les grosses sphères étant d'abord assez loin des balles mobiles, on observe avec une lunette l'extrémité du fléau ; puis on rapproche les grosses sphères. On voit aussitôt les balles se porter d'elles-mêmes à leur rencontre, ce qui prouve l'existence de leur attraction mutuelle. Sur la figure 3 on voit le levier mobile et les balles disposés dans une sorte de boîte qui les soustrait à l'agitation de l'air. On éclaire avec une lampe chaque extrémité du levier, et on la regarde avec une lunette.

L'attraction est excessivement petite dans cette expérience. Celle qu'observait Cavendish était à peu près égale à celle que la terre exerce sur un poids de $\frac{15}{1000}$ de milligramme. Connaissant la distance du centre de chaque balle à celui de la sphère voisine, on peut calculer, d'après la loi de Newton, l'attraction qu'on aurait, si la sphère était au centre de la terre, et comparer cette attraction à celle que la terre exerce sur la balle, laquelle est de 729 grammes. Le rapport de ces deux attractions est alors celui des masses de la terre et de la sphère. On arrive ainsi à connaître la masse de la terre.

Dès lors, les lois de Képler permettent de calculer les masses des planètes et du soleil, de sorte qu'on peut dire que l'appareil de Cavendish est une balance qui sert à peser les corps célestes.

Cette application de la physique à l'astronomie est un exemple remarquable de la puissance qu'acquiert le génie de l'homme, lorsqu'il sait comparer entre elles les observations les plus diverses, à l'aide du calcul mathématique. En rapprochant les mesures astronomiques de celles que fournit une simple expérience de cabinet, l'homme est arrivé à connaître les dimensions, les masses et les distances des astres, sans s'effrayer de l'immensité des cieux, et ce qui peut passer aux yeux du vulgaire pour une assertion hasardée n'est pour le mathématicien que le simple résultat d'un calcul, dont l'approximation dépend de la précision des données expérimentales qui lui ont servi de point de départ.

IV. Le poids des corps.

Jusqu'à présent, nous n'avons envisagé la gravitation qu'au point de vue des mouvements visibles des corps terrestres ou célestes. Il y a une autre sorte d'effets plus complexes, auxquels concourt la même cause : ce sont les pressions que les corps exercent sur les obstacles qui s'opposent à leur mouvement de gravitation. Un exemple familier est l'état d'un corps posé sur une table horizontale. Si cet obstacle était supprimé instantanément, le corps tomberait en vertu de l'attraction terrestre, conformément aux lois de Galilée. La présence de l'obstacle modifie l'état du corps, et nous devons chercher en quoi consiste cette modification.

L'observation nous apprend que le corps et l'obstacle sont déformés l'un et l'autre; nous appelons *action* la cause de la déformation de l'obstacle et *réaction* celle de la déformation du corps. Nous ne pouvons mesurer que la grandeur de la déformation; mais cette grandeur nous sert en même temps à représenter l'intensité de l'action mutuelle du corps et de l'obstacle. Le mot *poids* désigne cette intensité; la déformation est d'autant plus grande que le poids est plus grand.

Si nous prenons comme obstacle un ressort, dont une extrémité soit fixe et dont l'autre retienne le corps, comme cela a lieu quand on emploie un *peson*, la flexion du ressort est en rapport avec la déformation totale qu'il subit , et nous pouvons comparer la grandeur de cette flexion à la grandeur du poids. Deux corps A et B qui produisent la même flexion ont le même poids. La réunion de ces deux corps C produit une flexion plus grande, qu'on apprécie à l'aide d'une graduation. Si le corps A est pris pour terme de la comparaison des poids, tout corps qui produit la même flexion que le système C a un poids 2, et ainsi de suite. On conçoit ainsi la représentation numérique des poids.

Les unités de poids usitées sont le poids d'un centimètre cube d'eau, qu'on appelle gramme, et ses multiples ou sous-multiples.

On a reconnu que des corps de masses égales ont aussi des poids égaux, de sorte que dans le langage ordinaire on confond souvent la *masse* et le *poids*

d'un corps. On vient de voir que ces deux mots ont des sens très-différents. La gravitation pourrait ne pas exister, et pourtant les corps, sans avoir du poids, auraient chacun une masse qui leur serait propre.

Lorsqu'on élève sur la pente d'une montagne ou dans une ascension aérostatique un peson qui soutient un corps, on voit la flexion diminuer. On exprime ce fait en disant que le poids du corps diminue. En le mesurant, on reconnaît que sa diminution suit la même loi que la force d'attraction mutuelle qui s'exerce entre le corps et la terre, et dont nous connaissons l'expression newtonienne. Si le corps était porté à une distance de la surface terrestre égale au rayon du globe, son poids serait quatre fois moindre; telle est la conséquence de la loi observée.

On conclut de là que le même nombre peut servir à mesurer le poids d'un corps et l'attraction que la terre exerce sur ce corps ; il n'y a qu'à choisir des unités convenables pour mesurer la masse et la vitesse, et ce résultat sera obtenu. C'est en effet l'usage adopté.

On voit par les considérations qui précèdent que les notions de masse, vitesse, poids, résultent de la comparaison de diverses quantités mesurables, et qu'elles n'impliquent aucune connaissance de la cause intime de l'attraction. A l'aide de ces notions, le physicien enchaîne entre eux les nombreux phénomènes qui se passent à la surface de la terre, et qui sont dus à la pesanteur.

V. La transmission du travail. — La force vive.

Parmi les lois du mouvement des corps pesants, il en est une dont nous avons besoin de rappeler la signification précise.

Un corps, en tombant, est capable d'élever un poids égal au sien à une hauteur égale à celle de sa chute, un poids qui est la moitié du sien à une hauteur double, et ainsi de suite. On trouve donc des nombres égaux, quand on multiplie d'une part le poids du corps descendant par le chemin parcouru, d'autre part le poids du corps élevé par la hauteur de l'ascension.

C'est suivant cette loi que l'ouvrier qui est placé sur le bord du treuil des carriers, élève l'énorme pierre qui a été détachée préalablement des profondeurs du sol. Nous disons vulgairement que le poids de l'ouvrier entraîne la pierre. Voici ce qui se passe en réalité. Supposons que le poids de l'homme soit de 60 kilogrammes et que celui de la pierre soit 600 kilogrammes : lorsque l'homme descend de 10 centimètres, la pierre s'élève d'un centimètre environ ; je dis environ, parce que des phénomènes d'un autre ordre, qu'on appelle *frottements*, s'accomplissent sur l'axe du treuil. Plus les frottements sont faibles, plus l'effet observé s'approche de la loi énoncée ; elle est donc une loi limite, supposant qu'il n'y ait pas de frottements.

Le poids de l'homme agit ici comme *puissance ;*

celui de la pierre agit comme *résistance*. On appelle *travail moteur* le produit du poids qui descend par la hauteur de la descente, et *travail résistant* le produit du poids qui monte par la hauteur de l'ascension, et la loi limite s'énonce ainsi : *le travail moteur est égal au travail résistant*.

On prend pour unité de travail celui de 1 kilogramme se déplaçant de 1 mètre. On l'appelle *kilogrammètre*. Dans l'opération que nous venons de décrire, le mouvement est lent et uniforme : il ne faut pas que les corps acquièrent de vitesse appréciable. Si le poids moteur rencontre un obstacle dans sa chute, il ne doit se produire aucun choc ; sans cela des phénomènes d'un autre ordre interviennent ; nous les étudierons plus tard.

La loi que nous venons d'énoncer s'appelle le *principe de la transmission du travail*. On dit dans un langage figuré que le travail du poids moteur est transmis au poids résistant ; on dit encore, en envisageant le but final de l'opération, que le déplacement de la puissance est un *travail dépensé*, et que celui de la résistance est un *travail produit*.

Nous emploierons désormais ces expressions avec le sens que nous venons de leur attribuer.

Considérons encore un dernier genre de phénomène de pesanteur qui complétera notre initiation.

Lorsqu'un corps qui tombe librement rencontre un obstacle, il peut rentrer au repos, en *produisant un travail résistant* égal au *travail moteur* qui correspond à sa chute.

Le cas le plus simple est celui d'une bille d'ivoire tombant dans le vide sur un plan de marbre horizontal. Supposons que la bille pèse 1 kilogramme et que la hauteur de chute soit 425 mètres. La bille aurait à cet instant une vitesse de 91 mètres environ, d'après les lois de Galilée. Ce qui signifie que, si la pesanteur cessait à cet instant d'exister, la bille continuerait à se mouvoir indéfiniment en ligne droite, en parcourant 91 mètres par seconde. D'autre part, la chute représente un travail moteur de 425 kilogrammètres. Si ce travail n'a pas été transmis à d'autres corps, nous avons dans la bille la vitesse de 91 mètres. La bille touche le plan de marbre, aussitôt elle s'aplatit; elle perd peu à peu sa vitesse, il y a un instant où elle est en repos; puis elle reprend sa forme primitive et rebondit; elle acquiert donc une nouvelle vitesse de sens contraire à celui de la vitesse précédente. Or, en rebondissant, la bille remonte à la hauteur de 425 mètres environ. Cette opération représente un *travail résistant*, qui est produit par la suppression de la vitesse de chute, et ce travail est à peu près égal au travail moteur.

Finalement ce travail moteur a été suivi d'un travail résistant, qui serait rigoureusement égal au précédent, si certains phénomènes d'un autre ordre ne se passaient pas dans le corps pendant le choc. Nous étudierons plus tard ces phénomènes, qui sont analogues à ceux du frottement.

Nous conclurons de ces observations que la chute d'un corps peut déterminer la transmission du tra-

vail de deux manières : 1° par la descente lente et uniforme; 2° par la destruction de la vitesse qu'acquiert le corps en tombant.

On conçoit maintenant que les deux modes de transmission puissent s'accomplir simultanément. Le résultat final est toujours le même; il n'y a de différence à faire que dans l'époque de la transmission; cette transmission a lieu pendant la dépense même du travail moteur dans le premier cas, et après cette dépense dans le second.

On rencontre en physique et en mécanique une expression mathématique dont il est utile de comprendre ici l'origine. En prenant les unités adoptées, on trouve que le produit de la masse d'un corps par le carré de la vitesse qu'il acquiert en tombant librement dans le vide est le double du travail moteur qui correspond à la chute. Ce produit s'appelle *force vive*, expression purement mathématique, qu'il ne faut pas confondre avec la force newtonienne. L'usage de cette quantité facilite souvent l'exposition des lois du mouvement.

VI. Caractères de la force newtonienne.

En résumé, la gravitation, la chute et la pression des corps terrestres sur les obstacles sont les effets d'une même cause, dont la nature ne peut nous être révélée par l'observation. Mais quelle que soit sa nature, cette cause est caractérisée très-nette-

ment par les effets suivants. Elle détermine entre deux corps quelconques une attraction, dont Newton nous a donné la loi mathématique ; la valeur de cette attraction ou *force newtonienne* est toujours la même entre les mêmes corps placés à la même distance l'un de l'autre : cette force est donc *invariable*. Son activité est suspendue temporairement, lorsque les deux corps sont retenus par des obstacles qui les empêchent de se rapprocher mutuellement, comme si le travail qu'elle est capable d'accomplir était tenu en réserve ; ces corps exercent alors sur les obstacles une pression qui a la même mesure que leur force d'attraction. Lorsque la force opère le mouvement, elle est à l'état *dynamique ;* lorsqu'elle opère une pression, elle est à l'état *statique*.

L'homme utilise fréquemment la pesanteur pour obtenir ce qu'on appelle ordinairement la force motrice, c'est-à-dire pour produire les travaux mécaniques dont il a besoin. On appelle *machine motrice* un assemblage de corps destiné à un tel usage. Les plus importantes machines, dans lesquelles la force est empruntée à la pesanteur, sont les roues hydrauliques. Elles utilisent la force vive des cours d'eau que la pesanteur entraîne vers la mer. Elles sont d'ailleurs le siége de nombreux phénomènes dus aux autres forces, que nous étudierons dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III

L'ATTRACTION MOLÉCULAIRE

I. L'attraction mutuelle des molécules des gaz.

Lorsqu'on introduit un peu d'éther dans le vide barométrique (fig. 1), on voit le sommet de la colonne de mercure s'abaisser vivement et prendre une position fixe. Cet effet est dû à ce que le liquide, en arrivant dans l'espace vide qui surmontait le mercure, s'est réduit très-rapidement en gaz, et que ce gaz a refoulé le mercure. Lorsqu'on refroidit ensuite le tube barométrique par un moyen quelconque, on voit le sommet de la colonne de mercure s'élever graduellement, refoulant le gaz à son tour, et quand le volume de ce gaz a été suffisamment diminué, on aperçoit une petite couche de liquide ruisseler sur les parois du verre, et se rassembler au sommet du mercure. On ramène donc

la substance du gaz à son état primitif de liquide.

Évidemment les molécules du gaz se rapprochent les unes des autres pendant le refroidissement, et on peut penser qu'elles obéissent à une certaine loi d'attraction mutuelle. Mais l'intervention nécessaire de la chaleur dans l'opération la rend très-complexe, et on peut aussi penser que la cause du rapprochement des molécules est justement la chaleur. Dans cette hypothèse, l'attraction mutuelle ne serait qu'apparente, et elle ne serait pas due à une cause analogue à celle de l'attraction universelle.

Aujourd'hui les propriétés des gaz sont assez connues pour qu'on ait le droit d'admettre une attraction mutuelle entre leurs molécules ; ne pouvant exposer dans un ouvrage très-élémentaire les récentes expériences sur lesquelles est fondée cette opinion, nous nous contenterons d'un raisonnement qui sera plausible, je l'espère.

Si nous prouvons qu'il y a une attraction mutuelle, dans le sens newtonien, entre les molécules d'un liquide, nous devrons admettre qu'elle se manifeste dans la liquéfaction de la vapeur d'éther, dès que les molécules sont suffisamment rapprochées les unes des autres. Or, le caractère général de toute loi physique est la continuité ; ce qui signifie qu'il ne peut y avoir de changement brusque dans la grandeur d'aucune des quantités qui jouent un rôle dans un phénomène. Donc, à mesure que les molécules de l'éther s'écartent les unes des autres pour constituer la vapeur, elles ne

peuvent cesser de s'attirer, si elles s'attirent à l'état liquide : l'attraction peut décroître très-rapidement, devenir insensible ; elle ne peut cesser tout à coup.

II. L'attraction mutuelle des molécules des liquides.

Cherchons maintenant à prouver l'attraction moléculaire dans les liquides.

Voici une expérience de M. Dupré (de Rennes), qui ne peut laisser aucun doute.

Une tige de cuivre a une de ses extrémités recour-

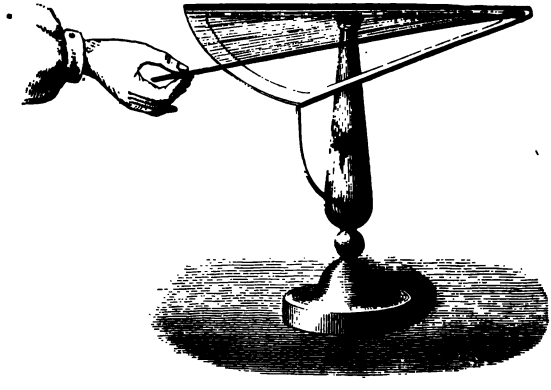

Fig. 4. — Expérience de M. Dupré.

bée, et introduite dans un petit trou, au bout d'une lame de cuivre (fig. 4). La tige étant appuyée sur la lame, on verse sur l'une et l'autre de l'eau de savon; puis on écarte la tige, en la faisant pivoter autour

de la pointe recourbée; on voit une nappe liquide s'étaler en éventail entre la tige et la lame. On abandonne ensuite la tige à elle-même, et elle revient s'appliquer contre la lame, comme si la nappe liquide était un ressort tendu. Il y a donc dans le liquide une contractilité propre, que l'on a pu mesurer, et qui nous révèle l'attraction mutuelle des molécules du liquide. Le liquide employé dans l'expérience précédente a une très-grande viscosité, qui permet d'exagérer la grandeur des effets, afin qu'on puisse les mesurer facilement. Mais le même phénomène se manifeste quel que soit le liquide.

D'après M. Dupré, l'attraction mutuelle de deux portions d'une même masse d'eau, situées de part et d'autre d'une section plane, est de 7 000 kilogrammes par centimètre carré; ce qui équivaut à une pression environ 7 000 fois plus grande que celle de l'atmosphère. Ce résultat a été obtenu à l'aide de calculs mathématiques et ne pourrait être déduit directement de l'observation; mais si les données expérimentales sur lesquelles on s'appuie ont le même degré d'exactitude que les lois de Képler, les nombres trouvés par M. Dupré sont aussi acceptables que ceux qui ont été trouvés par les astronomes pour les dimensions et les distances des planètes. Il en est de même des conséquences que le même auteur a déduites de ses formules, concernant le nombre des molécules qui se trouvent dans un volume déterminé. Le savant professeur de Rennes a calculé que, dans un cube d'eau ayant

pour côté 1 millième de millimètre, il y a beaucoup plus de 125 000 millions de molécules[1].

III. L'attraction mutuelle des molécules des solides. — Cristallisation.

Lorsque l'eau se refroidit suffisamment, en hiver, des aiguilles de glace apparaissent à sa surface; elles se rassemblent peu à peu et forment des glaçons, dont la merveilleuse structure nous est révélée par un grand nombre d'expériences[2]. La plupart des liquides peuvent cristalliser comme l'eau par le refroidissement. Parmi les exemples remarquables du passage de l'état liquide à l'état solide, je citerai le suivant, que nous devons à M. Gernez, et qui me servira à démontrer que les molécules sont soumises à une attraction mutuelle, analogue à l'attraction newtonienne.

Faites fondre avec une petite quantité d'eau de l'acétate de soude; puis laissez la liqueur se refroidir, en évitant qu'il reste sur les parois du vase la moindre parcelle de la substance solide. Lorsque la liqueur est revenue à la température ordinaire, versez-en une large goutte sur une plaque de verre. Touchez ensuite le centre de la goutte avec une aiguille portant à son extrémité une parcelle d'acétate de soude solide. Immédiatement la goutte se solidifie autour du point de contact, et vous voyez

[1] *Annales de chimie et de physique*, IVe série, t. VII.
[2] *La Chaleur* (Bibliothèque des merveilles).

des rayons de substance solidifiée s'étendre rapidement dans tous les sens, jusqu'au bord de la goutte. Ces rayons sont formés par de petits cristaux disposés en files régulières, et l'aspect nacré de la surface solidifiée indique une orientation particulière de ces cristaux.

Analysons ce phénomène. Dès qu'une parcelle de cristal a touché le liquide, ses molécules se sont précipitées sur cette parcelle ; un certain nombre de petits cristaux se sont formés autour de ce centre d'attraction. Puis chaque cristal est devenu à son tour un nouveau centre, vers lequel se sont précipitées d'autres molécules, et ainsi de suite ; la précipitation s'est opérée de proche en proche.

Il semble que la nature soit ainsi prise sur le fait, au moment où elle accomplit son travail, et que nous ayons déchiré le voile qui dérobait habituellement ce travail à nos regards. Chaque jour de semblables travaux se font autour de nous, suivant la même loi, avec la même perfection ; mais le plus souvent nous ne pouvons admirer que l'œuvre achevée, et la loi qui a présidé à l'édification de cette œuvre nous échappe. Quelquefois seulement, et souvent par un effet du hasard, les circonstances qui accompagnent les opérations de la nature se simplifient et il nous est donné d'en contempler les beautés. L'observateur attentif reçoit alors une excitation salutaire qui fortifie dans son âme le goût de la recherche ; non content d'avoir entrevu une vérité nouvelle, il multiplie les expériences, et

soumet à mille épreuves les raisonnements que lui a suggérés sa découverte, jusqu'à ce que la loi soupçonnée soit nettement et définitivement formulée.

Nous venons d'assister à la cristallisation d'un corps et nous savons que les molécules se sont précipitées les unes sur les autres, comme les corps terrestres se précipitent sur le sol, lorsqu'ils obéissent à la pesanteur. Si cette analogie est exacte, nous pouvons en poursuivre les conséquences, et chercher si elles se vérifient.

Or un corps qui tombe sur le sol, et qui ne rebondit pas s'échauffe toujours. Par exemple, une balle de plomb qui tomberait d'une hauteur de 1 275 mètres serait portée, en choquant le sol et perdant brusquement sa vitesse, à la température de l'eau bouillante. Voilà un fait d'expérience sur lequel nous reviendrons plus tard. Eh bien ! lorsque les molécules d'acétate de soude se rassemblent en cristaux, ne doivent-elles pas aussi perdre de la vitesse, et créer de la chaleur.

Ce résultat du raisonnement est très-exact. Prenons la liqueur qui a servi à notre expérience, et touchons-la avec une parcelle d'acétate de soude solide ; les cristaux vont se former comme précédemment ; le liquide se transformera rapidement en une masse blanche et compacte, et nous reconnaîtrons au simple toucher que cette masse s'est échauffée d'elle-même. Avec un thermomètre, nous observerions une élévation de température

de 30° environ. Notre prévision était donc juste.

Tous les faits observés conduisent à admettre une attraction moléculaire analogue à l'attraction universelle. Elle existe dans tous les corps, gazeux, liquides, solides, et elle concourt avec d'autres forces, telles que la chaleur, à grouper les molécules suivant des lois déterminées. Mais si le génie de Newton a su trouver une expression mathématique de l'attraction universelle, il n'en est pas de même de l'attraction moléculaire, et la loi du mouvement des molécules n'est pas encore établie définitivement. Tout porte à penser que les données expérimentales seront un jour utilisées par quelque nouveau génie, qui fondera une mécanique moléculaire, de même que Newton a fondé une mécanique céleste. Jusque-là la science doit multiplier les observations précises, comparer entre eux les faits connus, et bannir tout ce qui serait conjectural et hypothétique relativement à la cause intime de l'attraction.

IV. Exemples divers d'attraction moléculaire. — Absorption des gaz par les solides.

Les phénomènes qui s'opèrent entre les molécules semblables d'un corps ne sont pas les seuls qui dépendent de la force qui nous occupe. On étudie encore en physique l'adhérence de deux corps différents, soit solides, soit liquides, adhérence qui

se manifeste lorsqu'il n'y a pas d'air interposé entre les deux corps.

Le contact d'un liquide et d'un solide donne lieu à cette sorte d'effet. L'eau attire le verre qu'elle mouille, et cette action a tous les caractères de l'attraction moléculaire. C'est en vertu de l'action réciproque des molécules de l'eau et de leur action

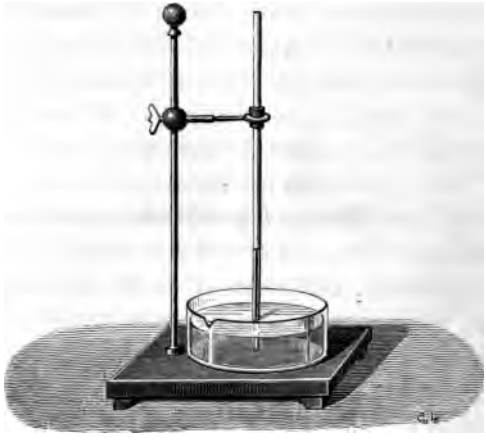

Fig. 5. — Expérience de capillarité.

sur celles du verre, que ce liquide s'élève dans un tube capillaire, et que sa surface prend une forme concave (fig. 5). Ce sont les lois de ce phénomène qui expliquent l'ascension de l'eau dans un morceau de sucre et dans les corps poreux.

Les gaz présentent des exemples frappants de

l'attraction mutuelle des molécules de substances différentes. Ils adhèrent très-facilement à la surface des solides, et s'y déposent en couche mince, dans laquelle la pression est supérieure à la pression atmosphérique. Ces effets sont souvent intenses avec les corps poreux, et des circonstances particulières les accompagnent.

Dans une éprouvette qui contient du gaz ammo-

Fig. 6. — Absorption des gaz par les solides.

niac sur la cuve à mercure (fig. 6), vous introduisez un fragment de charbon, préalablement rougi au feu, afin que l'air soit chassé de ses pores. Immédiatement, le gaz est absorbé ; le volume de gaz ainsi condensé dans les pores du charbon est 90 fois celui de ce dernier. Si l'on essayait de réduire le gaz à un aussi petit volume, en le comprimant par les moyens ordinaires, on le liquéfierait. Il faut conclure de là que le charbon opère cette liquéfaction, et, à l'appui de cette conjecture, on a remar-

que que les gaz les plus facilement liquéfiables sont aussi les plus absorbables.

L'absorption des gaz par les solides est un fait plus général qu'on pourrait le croire, et, chaque jour, de nouveaux exemples sont découverts. Les métaux les plus compactes en apparence présentent eux-mêmes cette propriété.

Un fragment de platine est chauffé au rouge; on le laisse refroidir au milieu de gaz hydrogène, puis on le place dans un tube de porcelaine fortement chauffé, et on fait le vide; le platine dégage alors de l'hydrogène. Le volume de gaz dégagé est le même, lorsque le fragment métallique a la forme d'un fil très-allongé ou une autre forme quelconque. Donc le gaz n'est pas retenu simplement à la surface; il pénètre dans l'intérieur du platine. M. Graham, qui s'est livré en Angleterre à ce genre de recherches, a vu le platine chauffé au rouge absorber 15 fois son volume d'hydrogène à la température de l'expérience. Si l'on suppose que les pores du métal occupent un espace total qui soit la millième partie du volume apparent, l'absorption ferait passer l'hydrogène du volume qu'il occupait sous la pression d'une atmosphère à un volume 15000 fois moindre, et, par conséquent, si l'hydrogène absorbé était gazeux, sa pression serait d'environ 15000 atmosphères. Quelle que soit l'incertitude du nombre que nous avons pris pour mesurer l'espace occupé par les pores, il est certain qu'il n'est pas exagéré, et que l'hydrogène ne pour-

rait rester gazeux dans ces pores sans y posséder une force élastique énorme. Bien que l'on n'ait pas encore réussi à liquéfier l'hydrogène, tout porte à croire que cette liquéfaction est opérée par le platine dans les expériences qui précèdent, à une pression inférieure à celle que nous venons d'évaluer, et que le phénomène de l'absorption de l'hydrogène par le platine est le même que celui de l'absorption du gaz ammoniac par le charbon.

M. Graham a observé de la même manière l'absorption de l'hydrogène par le cuivre, l'or, l'argent, le fer, le palladium. Ce dernier métal a un pouvoir absorbant beaucoup plus considérable que celui des autres métaux : on l'a vu absorber 600 fois son volume d'hydrogène, après avoir été chauffé seulement vers 100°. D'autres gaz ont été soumis aux mêmes opérations, et les résultats ont été semblables : le fer, par exemple, absorbe très-facilement l'oxyde de carbone, fait très-important pour la théorie de la fabrication de l'acier, qui, comme on le sait, est du fer combiné avec une petite quantité de carbone.

Parmi les curieux phénomènes qui sont dus à l'attraction des gaz par les solides, je citerai encore une expérience faite par M. Waidele, en Autriche. Une plaque d'argent poli, telle que celles qu'on emploie pour le daguerréotype, est immergée pendant quelque temps dans le gaz hydrogène. On promène ensuite sur sa surface un morceau d'éponge de platine, préalablement chauffé, pour qu'il n'y ait pas

d'hydrogène dans ses pores. Enfin, on insuffle l'haleine, et on voit apparaître la ligne suivie par l'éponge avec un teinte bleue, tandis que le reste de la plaque présente une teinte brune. On peut ainsi faire apparaître un dessin invisible par l'insufflation de l'haleine.

On voit aisément, d'après ce qui précède, quelle est l'explication de cette expérience. La plaque était recouverte d'un vernis de gaz hydrogène; l'éponge de platine, absorbant vivement ce gaz, a enlevé le vernis aux points touchés, et la vapeur d'eau de l'haleine s'est déposée plus abondamment sur ces points que sur les autres. Les images de Moser, bien connues en physique, sont dues à des actions du même genre.

Nous avons dit que la chute d'un corps sur le sol, la précipitation des molécules pendant la cristallisation, produisaient de la chaleur; nous devons nous demander si la précipitation des molécules d'une substance sur celle d'une substance différente ne produit pas aussi de la chaleur. La vérification de cette prévision confirmera l'opinion que nous avons émise, concernant la cause de l'adhérence. Les gaz se prêtent très-bien à cette vérification.

Lorsqu'on dirige un jet d'hydrogène sur un morceau d'éponge de platine, celui-ci se trouve rapidement chauffé au rouge, de sorte qu'il enflamme le jet de gaz, comme le ferait une allumette en ignition. On a construit depuis longtemps, d'après ce principe, le briquet à hydrogène (fig. 7). Quand on

ouvre le robinet, le gaz contenu dans la cloche centrale s'élance sur le platine et prend feu ; le jeu du robinet fait en même temps mouvoir, au moyen d'un mécanisme convenable, une petite lampe dont la mèche va s'allumer dans la flamme du gaz. L'eau acidulée s'élève dans la cloche, baigne le zinc qui

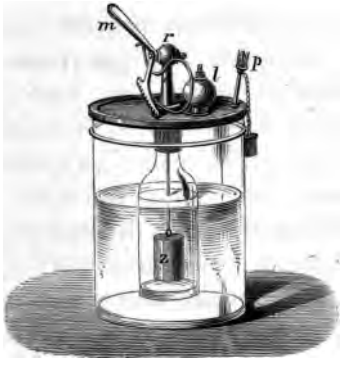

Fig. 7. — Briquet à hydrogène.

s'y trouve suspendu et dégage du gaz. Quand on ferme le robinet, la lampe revient à sa première position : la pression du gaz fait baisser le niveau de l'eau ; le zinc se trouve bientôt au-dessus du niveau, et le dégagement d'hydrogène s'arrête. L'appareil est prêt pour une nouvelle opération.

V. La diffusion et l'endosmose.

L'attraction entre les molécules de substances différentes s'observe encore dans les phénomènes

de dissolution. Un grand nombre de substances solides, telles que le sucre, le sel, disparaissent quand on les plonge dans l'eau ; on dit qu'elles se dissolvent. Leurs molécules sont séparées les unes des autres, malgré leur attraction mutuelle, comme si celles de l'eau exerçaient sur elles une attraction prépondérante.

Deux liquides différents peuvent aussi se mêler intimement, lorsqu'ils sont juxtaposés, et on appelle *diffusion* ce phénomène. Tout le monde a vu une couche de vin rouge surnager au-dessus d'une couche d'eau. Le mélange s'opère lentement, les molécules d'eau s'élevant peu à peu à travers le vin, tandis que celles du vin descendent, et, au bout d'un certain tèmps, l'eau est rougie dans toute son étendue ; les deux liqueurs sont parfaitement mêlées. La pesanteur n'est pas la cause de cette diffusion, car elle tend à placer, au contraire, celui des deux liquides qui est le moins dense, le vin, au-dessus de l'autre ; elle s'oppose donc à la diffusion, au lieu de la favoriser.

On peut répéter une expérience analogue à la précédente en se servant d'eau tenant en dissolution des corps solides, tels que les sels, le sucre, ou encore d'acides sulfurique, chlorhydrique, etc. Comme ces liquides sont plus denses que l'eau pure, on les met au fond du vase et on verse l'eau pure à leur surface avec précaution. Au bout d'un temps plus ou moins long, on trouve que le mélange est complet ; c'est par ce temps qu'on appré-

cie le pouvoir diffusif des diverses substances.

M. Graham a reconnu que les substances cristallisables se diffusent le mieux, et que les substances gélatineuses se diffusent très-peu. Ces dernières sont aussi perméables que l'eau pure aux substances diffusibles, mais elles sont imperméables aux autres substances. Ainsi placez au fond d'un vase un mélange de gomme et de sucre dissous dans l'eau; recouvrez-le d'une couche de gelée quelconque, et immergez le tout dans l'eau pure: au bout de quelque temps vous trouverez que le sucre, très-diffusible, s'est disséminé dans toute la masse; il a donc traversé la couche de gelée; la gomme, au contraire, non diffusible, est restée au fond du vase; elle n'a pas traversé la gelée.

Tous ces phénomènes ont pour cause une action particulière, qui s'exerce entre les molécules des liquides mis en présence et qui est attractive. Cette action est intense avec les corps diffusifs, et faible avec les autres; mais elle est due à une même force.

On peut obtenir avec les liquides et les gaz les mêmes effets qu'avec les solides et les liquides. Un liquide peut dissoudre certains gaz; par exemple, l'eau de Seltz est une dissolution de gaz acide carbonique dans l'eau; l'eau ordinaire tient en dissolution les gaz de l'atmosphère, et c'est la présence de ces gaz qui permet aux animaux aquatiques de respirer.

La diffusion peut aussi s'opérer entre deux gaz. On superpose deux ballons de verre, munis de robinets (fig. 8). Le ballon supérieur contient de l'hydrogène ; l'autre, de l'acide carbonique ; lorsque les robinets sont ouverts, les gaz se mêlent peu à peu,

Fig. 8. — Ballons pour la diffusion des gaz.

bien que l'hydrogène soit beaucoup plus léger que l'acide carbonique. L'attraction mutuelle des molécules gazeuses est donc démontrée.

Il s'est fait, depuis quelques années, de grands progrès en physique au sujet du genre d'actions qui

nous occupe, et ils ont été suivis d'applications industrielles importantes. Il est probable qu'ils contribueront à l'établissement de la mécanique moléculaire, parce qu'ils nous fournissent quelques données numériques dont la précision est sans doute suffisante. Essayons de donner un aperçu de ces progrès.

Vers 1826, Dutrochet a fait en France la découverte de l'*endosmose;* voici son expérience fondamentale. Un flacon, ayant pour fond une membrane de vessie, est fermé par un bouchon que traverse un tube de verre (fig. 9). Il contient une solution saline dont le niveau s'élève dans le tube. On plonge ce flacon dans l'eau pure. Au bout de quelque temps, la diffusion s'est effectuée entre les deux liquides, comme si l'eau pure avait été simplement versée avec précaution au-dessus de la solution saline; mais, en outre, le mélange est achevé beaucoup plus tôt, et le niveau du liquide s'est élevé dans le tube, indiquant qu'il y a eu deux mouvements d'inégales vitesses, l'un amenant l'eau pure dans le flacon,

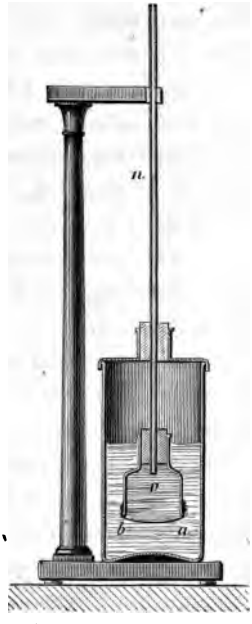

Fig. 9. — Expérience de Dutrochet.

l'autre portant le sel dans l'eau extérieure; c'est le mouvement de l'eau qui était le plus rapide. La membrane ne laissait passer ni l'un ni l'autre des liquides par filtration, quand il ne la touchait que d'un seul côté.

Nous retrouvons ici l'action mutuelle de deux substances, cause de la diffusion; nous avons de plus une action particulière de la membrane, c'est-à-dire une action des molécules du solide sur celles des liquides, laquelle n'a pas la même intensité dans les deux sens et favorise la diffusion.

Depuis la découverte de Dutrochet, de nombreuses expériences ont été faites sur diverses membranes et sur divers liquides, et M. Dubrunfaut a doté l'industrie des sucres d'un remarquable procédé d'épuration qu'on appelle l'*osmose*. La mélasse de betterave est un mélange de sucre cristallisable et de plusieurs sels organiques et minéraux dissous; lorsqu'elle est placée dans le flacon de l'appareil de Dutrochet, et que ce flacon est immergé dans l'eau pure, les sels passent dans cette eau, à travers la membrane, beaucoup plus rapidement que le sucre, tandis que l'eau pénètre dans le flacon, et, au bout de quelque temps, la solution de sucre est débarrassée de ces sels et peut donner du sucre pur par cristallisation. De grands appareils industriels ont été construits d'après ce principe, dans lesquels la membrane de vessie est remplacée par du papier modifié par l'acide sulfurique, qu'on appelle *papier parchemin*.

Une autre application de l'endosmose est la sépa-

ration des substances qui sont mélangées dans une solution, opération que M. Graham a appelée *dialyse*. Le mélange étant mis dans le flacon de l'appareil de Dutrochet, les substances qui ont le plus grand pouvoir diffusif traversent la membrane plus rapidement que les autres, et se concentrent dans l'eau extérieure. Par exemple, il est très-facile de séparer l'acide arsénieux d'un mélange quelconque à l'aide de cette méthode.

Il est essentiel de remarquer que l'action de la membrane avec le phénomène de l'endosmose ne suit pas les lois des actions capillaires, au moins celles qui sont connues aujourd'hui. L'endosmose est insignifiante quand on remplace la membrane par des tampons de plâtre, de charbon, d'argile non cuite.

Des phénomènes analogues à l'endosmose ont été observés avec les gaz. Dès 1777, le célèbre chimiste anglais Priestley observait le passage des gaz à travers les parois des vases de terre non vernissés. Plus tard on fit des expériences sur le passage de l'hydrogène à travers les enveloppes des petits ballons de caoutchouc. C'est M. Graham qui a trouvé la plupart des lois que nous possédons sur ce sujet, et bien que ces lois ne s'appliquent pas à l'endosmose des liquides, l'analogie entre ces deux sortes d'endosmose est assez grande pour qu'on les attribue à la même cause. M. Graham a même opéré la dialyse des gaz, en se servant d'une cloison de graphite comprimé, semblable à celui qui sert à la fabrication des crayons.

Si nous nous rappelons le pouvoir absorbant des métaux chauffés pour les gaz, nous concevrons aisément la variété des expériences auxquelles peut donner lieu l'endosmose des gaz. Voici par exemple une élégante expérience de M. H. Sainte-Claire Deville.

On dispose deux tubes concentriques, de manière que de l'hydrogène puisse être dégagé dans le tube intérieur, qui est en terre poreuse, et de l'acide carbonique dans l'intervalle des deux tubes (fig. 10). L'hydrogène passant d'abord seul dans le tube central, on l'enflamme à la sortie, puis on ouvre un robinet qui amène rapidement le gaz carbonique ; immédiatement la flamme se raccourcit, indiquant que l'acide carbonique a traversé la paroi de terre poreuse, et est venu se mêler à l'hydrogène. En même temps le jet d'acide carbonique qui sort de l'espace annulaire peut être enflammé, ce qui prouve qu'il est mêlé d'une grande quantité d'hydrogène. Au bout de quelque temps la première flamme s'éteint, la proportion de gaz carbonique mêlée à l'hydrogène étant trop considérable. Il y avait donc deux courants contraires à travers les pores du tube, l'un amenant l'acide carbonique à l'intérieur, l'autre, plus rapide, entraînant l'hydrogène dans l'espace annulaire. Ce sont justement là les effets de l'endosmose.

La diffusion des gaz rend sensible la porosité des corps auxquels on refuse habituellement cette propriété. Ainsi en prenant dans l'appareil précédent

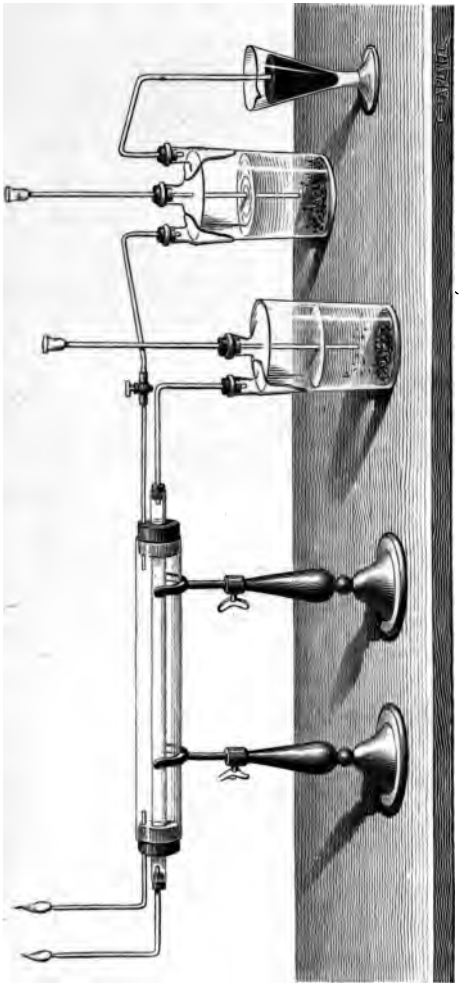

Fig. 10. — Appareil pour l'endosmose des gaz.

un tube central en acier et un tube extérieur en porcelaine, et portant ces tubes à une haute température, MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost ont réalisé avec l'hydrogène et l'azote une expérience analogue à la précédente. L'acier fortement chauffé se comporte donc comme un corps poreux.

La force de diffusion à travers les corps poreux peut être considérable, et cela est prouvé par une remarquable expérience de M. Cailletet. On passe au laminoir un canon de fusil, et on obtient ainsi un tube plat dont on ferme hermétiquement les extrémités : ce tube est ensuite placé dans une forge à réchauffer. Les gaz du foyer pénètrent alors dans l'intérieur du tube, s'y accumulent et acquièrent une pression capable d'écarter les parois, et de faire reprendre au tube la forme cylindrique. Cette observation explique les soufflures des grosses pièces de fer qui produisent un jet de gaz combustible quand on les perce.

VI. L'affinité chimique. Les atomes et les molécules.

Dans les phénomènes moléculaires que nous avons considérés jusqu'à présent, les molécules changent seulement de position, et conservent leur caractères essentiels, distinctifs pour chaque substance. Ces phénomènes se produisent suivant les mêmes lois, bien qu'avec des intensités différentes, quelles que soient les substances mises en expé-

rience. Ils constituent des propriétés générales des corps, et leur étude appartient à la physique proprement dite.

Les corps subissent dans certaines circonstances des modifications d'un autre genre, qui sont caractéristiques pour chaque substance, et qu'on étudie en chimie. On appelle substances composées celles qui peuvent être séparées en éléments, doués de propriétés distinctes, et constituées par la réunion de ces mêmes éléments. Ainsi l'eau est une substance composée d'hydrogène et d'oxygène, substances que nous ne connaissons qu'à l'état de gaz, mais qu'il est impossible de confondre l'une avec l'autre. 9 grammes d'eau peuvent se séparer en 8 grammes d'oxygène et 1 gramme d'hydrogène, et *vice versa* on peut réunir les mêmes poids de ces gaz et transformer le mélange en eau, dont le poids est 9 grammes. Un caractère essentiel d'une substance composée, c'est la constance des proportions pondérales de ses éléments.

Il résulte de notre manière de concevoir la molécule de l'eau, que nous devons la regarder comme l'assemblage de molécules d'oxygène et d'hydrogène, dans des proportions fixes et déterminées. Nous connaissons ces proportions par un genre d'expérience qu'on appelle l'analyse chimique, et quelle que soit la configuration de la molécule de l'eau, nous pouvons affirmer, comme une vérité d'observation, que les molécules de l'oxygène formant la molécule de l'eau ont un poids total qui

est 8 fois celui des molécules de l'hydrogène.

On appelle substances simples celles qui ne peuvent être séparées en éléments distincts : ainsi l'hydrogène et l'oxygène sont des substances simples, dans l'état actuel de la science. Cette restriction est importante, car il peut arriver que la découverte d'un procédé nouveau de séparation change cette opinion, et il y a plusieurs exemples de substances qui ont été pendant longtemps réputées simples, et qui sont composées, comme on l'a reconnu plus tard.

La divisibilité de la molécule en molécules élémentaires conduit à distinguer les molécules physiques et les molécules chimiques. Les premières sont semblables entre elles dans la même substance; les secondes sont dissemblables dans les substances composées : mais il n'y a pas de raison pour qu'on n'admette pas la divisibilité de la molécule physique dans les substances simples; seulement les molécules chimiques qui la composent sont semblables. Les molécules physiques sont comme des éléments de premier ordre, et les molécules chimiques comme des éléments de deuxième ordre. Il convient d'employer deux mots différents pour désigner ces deux ordres d'éléments. Nous appellerons simplement molécules les premiers, et atomes les seconds.

Par exemple, une molécule d'eau sera un assemblage déterminé d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène; la molécule d'hydrogène sera un assem-

blage d'atomes d'hydrogène. Dans l'état actuel de la science, nous ne connaissons que les proportions pondérales de l'hydrogène et de l'oxygène qui composent la molécule d'eau. Nous ignorons le nombre des atomes, de même que celui des molécules qui se trouvent dans une portion donnée de l'étendue; nous pouvons seulement conjecturer que leur nombre est considérable. Quant à la figure des atomes, cette question n'est autre que le problème de l'essence même de la matière, et il ne peut être résolu à l'aide des sciences d'observation seules; les données de ce problème doivent être complétées par celles que fournit la philosophie. Au contraire, les molécules, étant des assemblages d'atomes, sont figurables, et leur figure résulte de la disposition des atomes, considérés comme de simples points mathématiques. Il est impossible de connaître leur forme exacte; nous ne pouvons que faire des hypothèses, lesquelles seront admissibles si toutes leurs conséquences sont conformes aux lois observées, par exemple aux lois de la cristallisation. Il est en effet évident que la forme géométrique d'un cristal a une relation mathématique avec la forme de la molécule, puisque le cristal est un assemblage de molécules juxtaposées dans un ordre régulier.

La cause de l'union des atomes différents, pour former les substances composées, est appelée *affinité* par les chimistes; mais elle a tous les caractères de l'attraction moléculaire.

Les combinaisons chimiques sont accompagnées

de chaleur et souvent de lumière. Nous nous en servons pour le chauffage et l'éclairage. La combustion du charbon n'est que le résultat de l'attraction réciproque des atomes du carbone et de ceux de l'oxygène atmosphérique. Celle de l'huile, de la bougie, du gaz de la houille, est le résultat de l'attraction atomique de ce même oxygène, et du carbone ou de l'hydrogène contenus dans les molécules de ces substances. Ces dernières combustions sont plus complexes que la première, puisque les molécules de l'huile, de la bougie, du gaz de la houille, sont d'abord séparées les unes des autres, puis décomposées en leurs éléments simples, tandis que la combustion du charbon n'est précédée que par la séparation des molécules du carbone.

Les réactions chimiques offrent des exemples de la transmission du travail. En se représentant les atomes comme des masses soumises à des forces analogues à la force newtonienne, qui agissent, les unes comme puissances, les autres comme résistances, on conçoit que des travaux moteurs et des travaux résistants s'accomplissent dans les corps. Lorsque les premiers sont supérieurs aux derniers, les atomes acquièrent une vitesse, en vertu de laquelle ils se précipitent les uns sur les autres, et quand ils perdent leurs vitesses, ils créent de la chaleur, comme fait un corps qui vient choquer la terre.

Pour que cette conception, actuellement conjecturale, donne lieu à une véritable théorie, il faut

que les lois de l'attraction atomique et moléculaire soient formulées mathématiquement, et qu'on puisse calculer l'action mutuelle de deux atomes, ou de deux molécules, connaissant leurs masses et leurs distances, comme on sait le faire pour les corps célestes.

VII. La dissociation des corps composés.

Parmi les découvertes récentes, une des plus importantes est celle de la *dissociation*, que nous de-

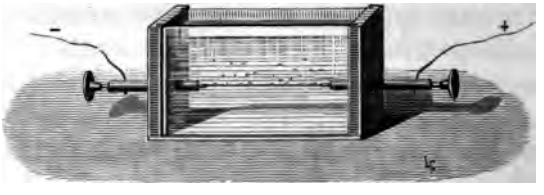

Fig. 11. — Appareil pour la dissociation de l'eau.

vons à M. H. Sainte-Claire Deville. On connaissait depuis longtemps plusieurs exemples de substances subissant une décomposition chimique partielle à diverses températures. M. Grove avait observé un dégagement d'hydrogène et d'oxygène, en plongeant dans l'eau une masse de platine incandescente. Cette expérience est très-facile à faire de la manière suivante : un fil de platine est tendu au milieu de l'eau, à l'aide de deux tiges de cuivre (fig. 11). On

attache à ces tiges les conducteurs d'une pile voltaïque, de manière que le fil de platine soit chauffé par le courant électrique. On voit alors de petites bulles de gaz se former sur le fil et s'en détacher successivement ; en les recueillant, on constate qu'elles sont formées par un mélange de gaz oxygène et hydrogène. En éclairant le fil avec une forte lumière et disposant de l'autre côté une lentille et un écran blanc, on obtient sur cet écran l'image très-agrandie du fil et des bulles, ce qui donne une belle expérience par projection.

M. Deville a fait une étude attentive de ce genre de décomposition, et il a reconnu qu'elle offre la plus grande analogie avec l'évaporation des liquides.

On sait qu'un liquide placé dans un espace clos produit des vapeurs, qui résultent de la séparation des molécules superficielles du liquide ; ces vapeurs se répandent peu à peu dans tout l'espace, et acquièrent une tension ou force élastique, qui est déterminée par la température de l'expérience. Alors les molécules liquides cessent de se séparer ; l'évaporation s'arrête : il est évident que c'est la vapeur formée qui fait obstacle. Plus la température est élevée, plus la quantité de liquide vaporisé est considérable, et enfin, à une température assez élevée, tout le liquide se réduit en vapeur ; la pression est alors beaucoup plus grande qu'auparavant.

Il y a dans cette opération deux actions contraires :

l'une, qui réside dans le liquide, tend à séparer les molécules; l'autre, qui réside dans la vapeur, s'oppose à cette séparation.

Outre ces actions physiques, il y aurait des actions chimiques suivant la même loi, lorsque le liquide est une substance composée. A une température quelconque, il y aurait dans l'eau, par exemple, une tendance à la séparation des atomes d'hydrogène et d'oxygène, et une décomposition superficielle; puis les gaz mis en liberté, acquérant une certaine tension ou force élastique, s'opposeraient à ce que la décomposition continuât, et un certain état d'équilibre s'établirait. Plus la température est élevée, plus la quantité d'eau décomposée serait considérable, et enfin à une température assez élevée, toute l'eau serait décomposée. La tension des gaz mis en liberté croîtrait rapidement avec la température.

A côté d'un phénomène quelconque de vaporisation, il y aurait ainsi, d'après M. Deville, un phénomène analogue de dissociation. A l'ébullition de l'eau sous la pression ordinaire, qui se fait à 100°, correspondrait la dissociation totale du même liquide sous la même pression, laquelle se ferait à 2 500° environ. A la condensation partielle de la vapeur d'eau par le refroidissement, correspondrait la réunion partielle des atomes d'oxygène et d'hydrogène dans un mélange de ces gaz qu'on refroidit.

On conçoit l'importance de la nouvelle voie ou-

Fig. 12. — Appareil pour la dissociation de l'oxyde de carbone.

ar l'idée de la dissociation dans le domaine
nécanique moléculaire, et déjà elle a conduit
ès-belles expériences. Je citerai une de celles
Deville, qui est pleine d'originalité et féconde
eignements.

ube de laiton est disposé dans l'axe d'un tube
celaine fortement chauffé (fig. 12); un cou-
pide d'eau froide traverse le tube de laiton,
êche sa température de s'élever au-dessus
, malgré l'énorme température du tube de
ine. Un courant lent de gaz oxyde de car-
averse l'espace annulaire compris entre les
ubes et se rend ensuite dans une solution de
. Au bout de quelques heures, on laisse re-
l'appareil, on le démonte, et voici ce qu'on
. La partie inférieure du tube de laiton est
te de noir de fumée; la solution de potasse
t de l'acide carbonique.

l'explication de ces effets. Concevons les
les d'oxyde de carbone qui viennent toucher
i inférieure, chauffée au rouge blanc, du
porcelaine. Elles sont dissociées; c'est-à-dire
nes de carbone et d'oxygène qui les compo-
séparent.

sortes d'actions chimiques pourraient avoir
carbone et l'oxygène devenus libres pour-
n refroidissant plus tard se réunir de nou-
t reformer des molécules d'oxyde de car-
a dissociation serait ainsi temporaire et ne
it aucune trace visible. Ou bien, l'oxygène

libre, rencontrant l'oxyde de carbone non décomposé dans certaines régions moins chaudes, mais non assez froides, se combinerait avec lui ; les atomes de l'oxygène se précipiteraient sur les molécules d'oxyde de carbone, et les transformeraient en molécules d'acide carbonique ; dans ce cas des atomes de carbone restés libres pourraient se déposer, en constituant des molécules de charbon : ce serait le résultat qui a été observé. Ou bien enfin, ce carbone rencontrant quelque part à une température convenable l'acide carbonique, le décomposerait et produirait la réaction suivante : les atomes du carbone s'unissant à une partie des atomes d'oxygène contenus dans l'acide formeraient des molécules d'oxyde de carbone, et le reste des atomes de l'acide formerait aussi de l'oxyde de carbone; finalement la dissociation aurait été suivie de la reformation de l'oxyde de carbone et ne laisserait aucune trace visible.

La première et la troisième des opérations que nous venons de décrire doivent s'accomplir dans l'expérience de M. Deville; mais, grâce à l'ingénieuse disposition de l'appareil, la seconde opération a pu s'accomplir aussi, et voilà comment la dissociation nous est révélée.

Les molécules d'oxyde de carbone situées dans la partie inférieure du tube de porcelaine se sont rapidement élevées après leur décomposition, parce qu'elles ont perdu de la densité ; les atomes de carbone ont alors rencontré la surface inférieure du

tube de laiton ; brusquement refroidis, ils se sont précipités les uns sur les autres, et ont formé les molécules de noir de fumée ; de là le dépôt observé sur le tube. Quant à l'oxygène, il a subi en continuant sa route, entraîné par le courant d'oxyde de carbone, la transformation en acide carbonique. L'artifice consiste à refroidir brusquement les produits de la dissociation pour les empêcher d'entrer dans de nouvelles combinaisons. C'est la difficulté de séparer ces produits qui a empêché jusqu'à présent les chimistes d'observer ces phénomènes, et tout porte à croire que dans la suite on les reconnaîtra dans une foule de circonstances.

VIII. Analogie de l'attraction moléculaire et de la gravitation universelle.

La relation qui existe entre la dissociation et la vaporisation a pour conséquence évidente une relation entre leurs causes. Au lieu de regarder l'affinité comme une force particulière, ayant des lois spéciales, il est plus simple de chercher à la déduire de l'attraction plus générale qui s'exerce entre deux masses très-petites, très-voisines l'une de l'autre. Tous les phénomènes moléculaires paraissent aujourd'hui dus à une même cause ; cette cause a un caractère analogue à celui de la gravitation ; elle a pour effet une attraction

mutuelle, qui a toujours la même valeur pour deux masses données, placées à la même distance l'une de l'autre. On peut donc dire que l'attraction moléculaire est une force d'intensité invariable.

L'affinité ne dépend pas, il est vrai, des masses atomiques seules et de leurs distances; elle dépend encore de la nature des corps, de sorte qu'un atome d'Hydrogène, par exemple, n'attire pas également une masse donnée d'oxygène ou de chlore. Il y a donc une différence notable entre la loi d'attraction physique et la loi d'attraction chimique. Mais tout porte à croire que le dernier genre d'attraction moléculaire résulte de l'intervention d'une autre force, qui est sans doute l'Électricité; une telle force jointe à la force newtonienne ne pourrait-elle pas expliquer l'affinité?

Le jour où l'on pourra calculer la valeur de l'attraction moléculaire à l'aide de la masse et de la vitesse des molécules, comme on sait le faire pour les corps célestes, l'œuvre de Newton aura été complétée. Il est probable qu'une même formule servira au calcul de l'action mutuelle de deux astres, aussi bien qu'à celui de l'action mutuelle de deux molécules, et, grâce à une telle synthèse, il sera donné à l'homme de voir l'intérieur des corps, comme il voit aujourd'hui les profondeurs de l'univers. Sans doute cette vue sera bien incomplète; des ombres épaisses cou-

vriront toujours un grand nombre de points du tableau ; mais quelle que soit l'audace des entreprises humaines, avouons humblement qu'il ne nous appartient pas de jouir en ce monde de toutes les splendeurs de la création.

CHAPITRE IV

LA CHALEUR

I. Origine mécanique de la chaleur.

Lorsqu'un corps tombe sur le sol et ne rebondit pas, il subit une modification que nous caractérisons par le mot *échauffement* dans le langage ordinaire, par le mot *élévation de température* dans le langage scientifique. Le premier mot est l'indication d'une sensation particulière que nous éprouvons en touchant le corps; le second représente un effet purement physique auquel le sens du toucher ne concourt pas. Voici quel est cet effet : un thermomètre étant mis en contact avec le corps, on voit le mercure monter dans la tige de l'instrument; on compte le nombre des divisions de l'échelle que le sommet de la colonne a parcourues, et ce nombre mesure l'*élévation de la température*.

Nous avons dit précédemment qu'une balle de plomb serait ainsi portée à la température de l'eau bouillante, qui correspond à 100° du thermomètre centigrade, si elle tombait d'une hauteur de 1275 mètres. Si elle tombait d'une hauteur supérieure à 4300 mètres, à peu près la hauteur du mont Blanc, elle fondrait. Semblablement, une balle de fer qui tomberait d'une hauteur de 48 kilomètres environ serait portée à 1000°, et, par conséquent, serait chauffée au rouge et paraîtrait incandescente après le choc; elle serait donc à la fois chaude et lumineuse. On obtiendrait le même effet en donnant à la balle, par un moyen quelconque, une vitesse de 974 mètres, et l'arrêtant subitement par un obstacle non élastique.

Ces résultats sont indépendants de la masse du corps, et, par conséquent, une molécule de fer qui perdrait subitement, dans une circonstance quelconque, une vitesse de 974 mètres, atteindrait la température de 1000° et deviendrait lumineuse.

L'attraction moléculaire est capable d'imprimer de telles vitesses aux particules des corps, et quand ces vitesses sont détruites, sans que le travail moteur qu'elles représentent soit transmis à d'autres corps, il y a création de chaleur et de lumière.

II. Équivalence de la chaleur et du travail mécanique. — En quoi consiste le frottement.

Ces exemples font comprendre comment une même loi règle la production de la chaleur et de la lumière par le choc et par les actions moléculaires. Quelques notions préliminaires nous permettront de comprendre cette loi, qui est peut-être la plus grande découverte de la physique moderne, et qui sert de base à *la théorie mécanique de la chaleur*.

On a vu dans le chapitre II qu'un corps peut perdre sa vitesse en la transmettant en quelque sorte à un autre corps, de sorte que le travail résistant de ce dernier soit égal au travail moteur du premier. On peut dire que le corps qui perd de la vitesse *perd du travail*, et que celui qui gagne de la vitesse *gagne du travail*. L'effet est mesuré par le travail, suivant les règles de la mécanique, et cette quantité s'évalue en kilogrammètres[1]. En se plaçant à un autre point de vue, on dit encore que le corps *dépense du travail* en perdant de la vitesse, et *produit du travail* en donnant de la vitesse à un autre corps. Enfin, la *transmission du travail* d'un corps à un autre désigne l'opération prise dans son ensemble, sans qu'on ait à se figurer le détail de l'opération.

[1] Voyez page 26.

Lorsque le travail transmis est plus petit que le travail dépensé, on dit qu'il y a *perte de travail*. C'est alors que la *chaleur* peut *apparaître*.

Le mot chaleur désigne ici un certain effet mesurable, sans qu'on ait à s'occuper de la cause ou force qui le produit. Un corps qui s'échauffe gagne de la chaleur, ce qui signifie qu'il acquiert une certaine activité ou *énergie* qui le rend apte à certains phénomènes. Prenons 1 kilogramme d'eau à la température zéro, c'est-à-dire dans un état défini par le thermomètre, et chauffons-le jusqu'à ce qu'il ait la température de 1°; la quantité de chaleur donnée à cette eau est ainsi parfaitement définie; nous la prenons pour unité, et nous l'appelons *calorie*. Cette quantité, répétée plusieurs fois, donnera une quantité de chaleur plus grande, qui sera mesurée par un certain nombre de calories. On apprend en physique à mesurer ainsi les quantités de chaleur.

On comprendra dès lors le sens des expressions suivantes. Un kilogramme de plomb est porté de la température zéro à la température de 100°, quand on lui donne 3 calories; il est porté à 200° environ, quand on lui donne 6 calories.

Nous pouvons maintenant énoncer le principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur.

Lorsqu'un corps perd de la vitesse, sans produire un travail égal au travail dépensé, et qu'il crée de la chaleur, le travail anéanti est proportionnel à la quantité de chaleur créée.

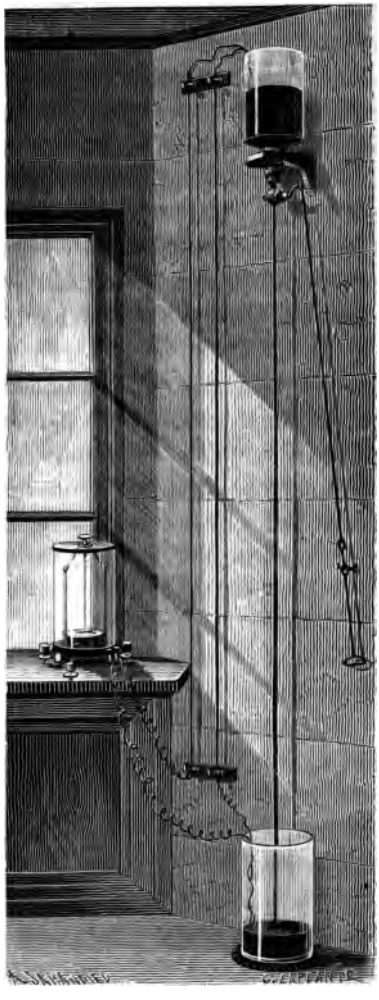

Fig. 13. — Chaleur produite par la chute du mercure.

Expliquons cette loi sur un exemple.

Un kilogramme de plomb tombe d'une hauteur de 1275 mètres, sans surmonter aucune résistance; il rentre au repos en choquant le sol, sans transmettre aucun mouvement visible aux corps environnants; il crée alors 3 calories. Si ce même corps tombait d'une hauteur double, il créerait dans les mêmes circonstances 6 calories, et ainsi de suite.

Dans le premier cas, le travail anéanti se-

rait de 1275 kilogrammètres pour 3 calories créées. Divivisons 1275 par 3, et nous aurons le travail qui correspondrait à 1 calorie. Nous trouvons 425 : ce serait la mesure du travail qui est anéanti, lorsque le corps crée 1 calorie.

L'expérience n'a pas été faite dans les conditions où nous nous sommes placés pour donner un exemple; mais un grand nombre d'observations nous apprennent que, si on la tentait, les choses se passeraient comme nous l'avons dit. Les observations faites sur une aussi grande échelle ne sont pas d'ailleurs susceptibles d'une précision suffisante, et les physiciens ont imaginé d'autres méthodes dont l'exactitude ne laisse rien à désirer, et qui résolvent parfaitement la question. Je me contenterai d'indiquer une manière d'opérer qui se prête particulièrement à la démonstration, à cause de sa simplicité.

On dispose à une hauteur de 3 ou 4 mètres un vase qui contient du mercure et qui est fermé par un robinet, muni d'un levier, afin qu'on puisse aisément l'ouvrir et le fermer sans s'élever à cette hauteur. Sur la même verticale, au-dessous de ce vase, on place un second vase de fer mince (fig. 13), et contenant aussi du mercure. On établit un circuit thermo-électrique, à l'aide de deux soudures plongeant respectivement dans le mercure de chacun des vases et d'un galvanomètre. On s'assure d'abord par la position de l'aiguille du galvanomètre de l'égalité de température de ces deux vases,

et on l'établit si elle n'a pas lieu. Puis on ouvre le robinet ; le mercure tombe dans le vase inférieur, et y perd la vitesse qu'il avait acquise pendant la chute, sans produire aucun travail appréciable. Immédiatement l'aiguille du galvanomètre entre en mouvement et indique que le vase inférieur s'échauffe graduellement. On conçoit qu'il soit possible de mesurer l'élévation de la température, et d'en déduire suivant les règles de la physique le nombre de calories créées. Quant au travail anéanti, on l'obtient en multipliant le poids du mercure tombé par la hauteur de chute.

Il y a un grand nombre de circonstances autres que le choc dans lesquelles un corps en mouvement peut perdre de la vitesse et créer de la chaleur ; je citerai le frottement, qui peut produire beaucoup de chaleur et de lumière, dont nous avons journellement des exemples très-frappants. Il y a longtemps qu'on avait observé que le frottement est accompagné d'une perte de travail. Dans toutes les machines destinées à transmettre le travail, il y a des pièces qui se touchent en se mouvant avec des vitesses différentes : ainsi les tourillons des roues tournent dans des coussinets qui sont habituellement fixes. Toujours le travail moteur surpasse le travail résistant effectivement recueilli. Par exemple, avec un treuil, le travail qui correspond à la descente du poids moteur est toujours supérieur au travail qui correspond à l'élévation du fardeau. Aussi il serait impossible que le fardeau agissant

comme puissance redescendît à son point de départ, en relevant le poids moteur, devenu résistance, à sa position primitive. C'est en cela que consiste l'impossibilité du *mouvement perpétuel*.

On disait que le frottement consommait du travail, et que le travail moteur se transformait en partie en travail résistant utile, en partie en travail de frottement. On arrivait ainsi à envisager le frottement comme l'effet d'une force particulière, qu'on appelait *résistance passive*. Une observation plus attentive des phénomènes du frottement a fait rejeter l'introduction de ce genre de force dans la science. On peut bien trouver dans l'usure des corps frottants une partie du travail perdu ; car cette usure est l'arrachement des particules des corps, et l'attraction moléculaire a été surmontée, comme une résistance ; il y a donc réellement dans cette opération un certain travail produit, mesurable en kilogrammètres. Ce travail est relativement peu considérable, et il n'atteint pas la valeur de tout le travail anéanti. Mais il y a une production de chaleur qui est proportionnelle à la perte de travail, comme l'ont montré en 1857 les expériences de M. G. A. Hirn, et cette proportionnalité n'est plus contestée aujourd'hui. Il y a donc entre le travail perdu et la chaleur créée un rapport *de cause à effet*, et l'expression la plus simple du fait observé est la *conversion du travail en chaleur*.

III. Équivalent mécanique de la chaleur.

On conçoit que ce genre d'expériences ait pu conduire à un nombre mesurant la quantité de travail qui peut être convertie en une calorie. Les nombres obtenus par divers physiciens, à l'aide de diverses méthodes, diffèrent peu les uns des autres, et peu de ceux qu'on obtient en observant d'autres modes de production de la chaleur par le travail, tel que le choc des corps. Les différences sont dues à l'incertitude des observations, et à une complication de circonstances qu'il est souvent impossible d'éviter, et dont il est difficile de tenir compte avec une précision suffisante.

La comparaison de tous ces nombres permet d'adopter un nombre limite, qui représente la véritable quantité de travail correspondant à une calorie, et qui suppose la conversion opérée dans les circonstances les plus simples. On appelle ce nombre *équivalent mécanique de la chaleur*. Sa valeur provisoire est 425 kilogrammètres.

On doit naturellement se demander si le principe réciproque du précédent est vrai ; si la chaleur peut être convertie en travail, de même que nous venons de voir le travail convertible en chaleur.

Tout le monde sait que la chaleur sert à mettre en mouvement les machines à vapeur, qu'un corps qui se dilate en s'échauffant peut surmonter la ré-

sistance d'un obstacle; qu'un solide fond, qu'un liquide se vaporise par l'action de la chaleur. Tous ces effets sont des exemples de travail résistant produit. Avec une machine à vapeur nous élevons un fardeau ; le poids de ce fardeau multiplié par son élévation donne la mesure du travail gagné ; de l'air renfermé dans une vessie close et échauffé écarte les parois de l'enveloppe, et par conséquent surmonte la résistance de l'atmosphère, qui est de 1 kilogramme environ par centimètre carré de surface ; si chaque centimètre de la vessie est écarté de 1 centimètre, on a un travail gagné, mesuré par $\frac{1}{100}$ de kilogrammètre ; si la surface totale de la vessie a 1000 centimètres carrés, le travail total est de 10 kilogrammètres. Enfin dans la fusion et la vaporisation les molécules sont séparées les unes des autres, l'attraction moléculaire agit comme résistance, de même que la pesanteur quand on élève un poids ; ces opérations constituent donc encore du travail gagné.

Il est donc certain que la chaleur sert à la production du travail ; mais cela ne nous autorise pas à dire que la chaleur est convertie en travail. Pour que cette assertion soit légitimée, il faut prouver que la chaleur est réellement anéantie, lorsque le travail mécanique est gagné.

Tel est justement le fait démontré expérimentalement par M. G. A. Hirn, dès 1856[1] ; il n'est pas

[1] *Bulletin* 133 *de la Société industrielle de Mulhouse.—Exposition de la Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, 1862.

plus contestable aujourd'hui que le précédent.

M. Hirn a expérimenté sur la machine à vapeur: la filature de la maison Haussmann, Jordan, Hirn et Cie, au Logelbach (Haut-Rhin), est devenue le foyer de recherches scientifiques remarquables, qui ont valu à leur auteur une réputation européenne. Hommage soit rendu à l'homme dont l'esprit sait résister aux agitations d'une grande entreprise industrielle, et se livrer, aux heures de loisir, aux nobles spéculations qui font la véritable grandeur de l'humanité!

L'usine est le laboratoire; des machines de 100 chevaux-vapeur sont les instruments : on mesure le poids de charbon consumé sur la grille de la chaudière ; on en déduit par le calcul la quantité de chaleur donnée à l'eau et à la vapeur. On mesure le poids, la température de l'eau injectée dans le condenseur ; le poids et la température de l'eau qui sort du condenseur, et qui provient de la précédente et de la vapeur liquéfiée après son passage dans le cylindre de la machine. Ces mesures servent à calculer la chaleur dégagée pendant la liquéfaction de la vapeur ; on fait les corrections nécessaires pour tenir compte de toutes les circonstances accessoires qui accompagnent cette expérience gigantesque, et finalement on a deux nombres de calories, l'un mesurant la chaleur prise au foyer par un kilogramme de vapeur, l'autre la chaleur restituée dans le condenseur par le même poids de vapeur. Quel rapport présentent ces nombres?

Il y a quelques années un savant eût répondu rès-probablement : *Ces deux nombres sont égaux.* L'état de la science autorisait cette réponse.

Eh bien, M. Hirn trouve que le premier est plus grand, toujours plus grand que le second.

D'autre part, on mesure le travail utile produit par la machine; on calcule le travail qui provient du passage dans la machine du kilogramme de vapeur; on trouve que ce travail est toujours proportionnel à la différence des deux nombres de calories.

Donc il y a disparition de chaleur lorsque la chaleur sert à produire du travail, et l'on peut dire qu'elle est convertie en travail dans la machine à vapeur.

Voilà un nouveau principe introduit dans la science. L'expérience de M. Hirn en est la première démonstration éclatante, et, depuis, toutes les observations la confirment et nous autorisent à énoncer comme une vérité physique la loi suivante :

Lorsque la chaleur est employée à produire du travail, à l'aide d'un corps quelconque, il y a disparition d'une quantité de chaleur proportionnelle au travail produit ; à chaque calorie disparue correspondent 425 kilogrammètres gagnés.

Les deux principes que nous avons formulés se résument dans un principe unique, plus général : *la chaleur et le travail mécanique sont des quantités équivalentes.*

IV. L'attraction moléculaire dans l'eau. — La chaleur de combinaison.

Ce principe établit un lien remarquable entre les phénomènes les plus dissemblables en apparence; il resserre encore le lien qui existe entre la gravitation et l'attraction moléculaire.

Considérons, en effet, 1 kilogramme d'eau, et suivons les diverses transformations qu'il peut subir.

A l'état de glace à la température zéro, il exige 79 calories pour fondre; cette chaleur disparaît dans l'opération, et un travail moléculaire équivalent est produit, si l'on suppose qu'il n'y ait pas de résistance extérieure faisant obstacle au changement de volume qui résulte du changement de position des molécules. Ce travail est le même que celui de 1 kilogramme élevé à une hauteur de 33575 mètres.

A l'état de liquide à 100°, notre kilogramme d'eau exige 536 calories pour se réduire en vapeur sous la pression d'une atmosphère. C'est ce qui aurait lieu si on renfermait l'eau dans une enveloppe imperméable, flexible comme une vessie, et suffisamment grande. Cette enveloppe, ne contenant que l'eau d'abord liquide et étant parfaitement close, serait d'abord réduite au volume d'un litre par la pression de l'atmosphère; puis, à mesure que la vapeur se produirait, l'enveloppe se gonflerait et finirait par atteindre un volume 1700 fois plus

grand. La pression de la vapeur serait toujours égale à celle de l'atmosphère pendant le gonflement.

Quels sont les travaux produits? Il y a d'abord l'écartement des molécules, représentant un travail moléculaire analogue à celui de la fusion; mais il y a, en outre, le travail de la résistance de l'atmosphère, qui est graduellement surmontée. Ces deux travaux sont distingués par les épithètes *intérieur*, donnée au premier, et *extérieur*, donnée au second : il est aisé de les calculer.

Le travail extérieur est celui de 1 kilogramme élevé à 17568 mètres de hauteur; on le calcule d'après la règle donnée précédemment, en multipliant l'accroissement du volume par la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. On connaît ensuite le travail total qui équivaut à 536 calories : c'est celui d'un kilogramme élevé à l'énorme hauteur de 227800 mètres.

D'après notre principe, les 536 calories ont disparu dans l'opération et ont été converties en travail mesuré par le nombre précédent. Sur cette quantité de travail, 17568 kilogrammètres représentent le travail extérieur, et la différence 210232 mesure le travail intérieur. Ainsi, le travail moléculaire, dans la vaporisation de l'eau à 100°, est celui de 1 kilogramme élevé à 210232 mètres; il est environ 12 fois le travail extérieur.

Inversement, 1 kilogramme de vapeur qui se liquéfie dans les mêmes circonstances produit autant de chaleur que la chute de 1 kilogramme tombant sur

la terre d'une hauteur de 227800 mètres ; et la congélation de 1 kilogramme d'eau à zéro équivaut à une chute de 33575 mètres. Finalement, les deux opérations réunies équivalent à une chute de plus de 261 kilomètres. Une pierre pesant 1 kilogramme qui tomberait du sommet du mont Blanc ne produirait qu'un effet 70 fois moindre.

La puissance de l'attraction moléculaire est encore plus grande dans les actions chimiques.

Pour obtenir 1 kilogramme d'eau, il faut combiner 111 grammes d'hydrogène et 889 grammes d'oxygène environ. Pendant la combinaison, les atomes de ces substances se précipitent les uns contre les autres, et de leur collision résulte la création de 3800 calories. Cette quantité de chaleur équivaut à la chute de 1 kilogramme de la hauteur de 1600 kilomètres (400 lieues environ). Si l'on considère combien est petite la masse d'un atome, on voit combien doit être énorme la vitesse qu'il perd, quand la combinaison s'opère. Aussi la chaleur créée est-elle assez intense pour qu'il y ait production de lumière.

Lorsque des collisions semblables à celles que nous venons de décrire s'accomplissent et se succèdent dans une portion de l'espace, cette portion est une *source de chaleur;* elle devient *source de lumière*, quand la vivacité de la collision est suffisamment grande. C'est ainsi que la flamme de l'hydrogène, dans l'expérience de la *lampe philosophique* (fig. 14), est le lieu d'une collision entre les atomes de l'hydro-

gène qui sort du flacon et ceux de l'oxygène atmosphérique. L'eau qui résulte de cette collision s'élève dans l'air, à l'état de vapeur invisible, et s'y mêle à mesure qu'elle se produit ; la réaction du zinc, de l'eau, de l'acide sulfurique que renferme le flacon, renouvelle sans cesse l'hydrogène ; il avive la

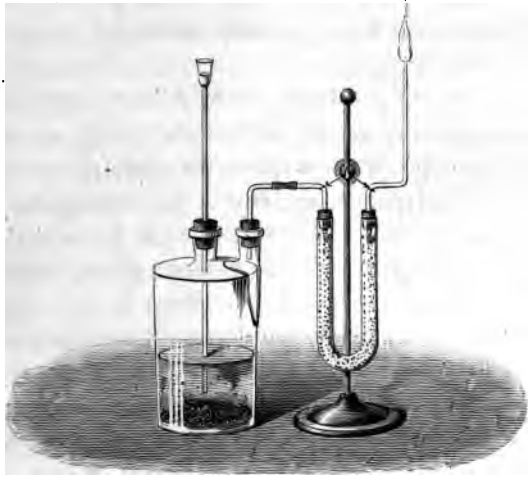

Fig. 14. — Lampe philosophique.

flamme, s'y transforme en eau, de sorte que la collision est incessamment renouvelée à la même place. C'est à cette place que nous voyons la lueur que nous appelons flamme. Les atomes sont toujours fortement chauffés, lorsqu'ils s'y trouvent, puis ils s'élèvent, se refroidissent et sont remplacés

par d'autres atomes qui se comportent comme eux.

Notre principe s'applique encore à la décomposition chimique, qui est une opération inverse de la combinaison. Les atomes dissemblables sont alors séparés les uns des autres ; leur attraction mutuelle joue le rôle d'une résistance, qui est surmontée par une puissance extérieure, et par suite leur séparation est l'accomplissement d'un travail résistant.

Nous avons dit que la chaleur était capable de dissocier l'eau, de la décomposer. En vertu de notre principe, il y a disparition d'une quantité de chaleur équivalente au travail de séparation des atomes d'oxygène et d'hydrogène, et de même que dans la formation de 1 kilogramme d'eau 3800 calories apparaissent, de même dans la décomposition de ce poids d'eau 3800 calories disparaissent. L'opération équivaut à l'élévation de 1 kilogramme à 400 lieues de hauteur.

On peut faire des calculs analogues aux précédents pour tous les corps composés. Il y a pour chacun d'eux une *chaleur de combinaison* et un *travail moléculaire* qui lui sont propres.

Les développements que nous avons donnés jusqu'ici, ont pour objet d'établir une relation précise entre la gravitation, l'attraction moléculaire et la chaleur. Mais il n'est pas question de la nature des causes qui déterminent les phénomènes. Le mot chaleur désigne simplement un certain effet, me-

surable à l'aide d'une unité arbitraire, la calorie. Il n'y a pas d'autres considérations à introduire en physique, lorsqu'on cherche seulement les lois numériques des phénomènes, et leur enchaînement. Lorsque nous disons, sur 100 calories employées par un corps, 10 sont conservées dans le corps (chaleur sensible), 20 ont été converties en travail extérieur, le reste a été converti en travail intérieur, nous exprimons un fait d'expérience, résultat direct ou indirect des observations ; nous ne voulons pas figurer cette chaleur, lui assigner une forme, une manière d'être déterminée. Son essence est tout à fait en dehors de la question.

Tel est le caractère fondamental de la *Théorie mécanique de la chaleur*, caractère qui appartient aussi à la théorie de la gravitation. Le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail est l'expression d'une vérité physique, comme le principe de l'attraction newtonienne, et on s'en sert pour enchaîner les phénomènes du même ordre, sans chercher à se figurer aucun agent particulier.

Nous continuerons notre exploration, en suivant la même méthode, et évitant toute hypothèse sur la nature de la chaleur. Nous montrerons en quoi ses effets diffèrent de ceux de l'attraction.

V. Conservation de l'énergie.

Imaginons deux corps séparés de tous les autres corps de l'univers ; s'ils n'ont pas la même température, ils agissent l'un sur l'autre, sans qu'il résulte de cette action mutuelle aucun mouvement visible. Le corps dont la température est la plus élevée perd de la chaleur; l'autre en gagne une quantité égale, et alors l'action mutuelle cesse; les deux corps sont à la même température. Cette tendance à l'équilibre est caractéristique, et jusqu'à ce que la chaleur soit équilibrée entre les corps, certaines modifications corrélatives s'accomplissent dans leur intérieur.

Nous connaissons déjà quelques-unes de ces modifications. Dans le corps qui se refroidit, les molécules obéissent à leur attraction mutuelle, et le travail qu'elles dépensent est converti en chaleur. De plus, si le corps se contracte par l'effet du déplacement des molécules, comme cela a lieu le plus souvent, et s'il est soumis à une pression sur sa surface, par exemple à celle de l'atmosphère, il y a un travail extérieur dépensé, qui est aussi converti en chaleur. La chaleur provenant de ces deux origines, et une certaine quantité de chaleur qui existait antérieurement dans le corps l'abandonnent.

Dans le corps qui s'échauffe, les modifications sont inverses. Les molécules sont déplacées en sens contraire de leur attraction mutuelle, de sorte qu'il

y a un travail intérieur produit, et une quantité de chaleur équivalente anéantie. En outre, si le déplacement moléculaire donne lieu à une dilatation, et si le corps supporte une pression extérieure, telle que celle de l'atmosphère, il y a un travail extérieur produit, auquel correspond la disparition d'une seconde quantité de chaleur. Enfin, la chaleur contenue dans le corps, et que nous avons appelée chaleur sensible, augmente. La somme de ces trois quantités de chaleur est précisément égale à la chaleur totale qui a abandonné le premier corps, lorsque l'équilibre de température est atteint.

La chaleur créée par le corps et la chaleur sensible qu'il a perdue, se retrouvent donc finalement dans le second, en partie à l'état de chaleur sensible, en partie sous forme de travail mécanique. Si nous recourons à une expression, qui désigne aussi bien la chaleur que le travail, l'action mutuelle des deux corps peut être formulée très-simplement.

Nous appellerons désormais *énergie*, une quantité de chaleur, ou une quantité de travail, et si nous voulions représenter en nombres une quantité d'énergie, nous n'aurions qu'à multiplier le nombre de calories qui mesure la chaleur par 425, et à évaluer le travail en kilogrammètres, comme précédemment; l'unité d'énergie serait alors le kilogrammètre.

Voici maintenant un moyen de formuler l'action mutuelle de deux corps à des températures diffé-

rentes. L'*énergie* du corps chaud *diminue* graduellement, et celle du corps froid *augmente* de la même quantité, jusqu'à ce que les corps aient atteint la même température.

Par conséquent, l'*énergie totale du système des deux corps ne change pas*. Tel est le principe de la *conservation de l'énergie*, qui unit par un lien mathématique les modifications calorifiques des corps, et celles qui ont pour cause l'attraction.

Nous avons pris pour exemple deux corps seulement. On conçoit que ce cas soit irréalisable dans la nature. Tous les corps de l'univers agissent les uns sur les autres, et il est probable que ces actions s'opposent à ce qu'ils puissent atteindre la même température. Une admirable harmonie règle toutes ces actions, et chacune des lois que nous formulons n'est qu'une subdivision de la loi universelle qui échappe à l'investigation humaine. Aussi ne devons-nous pas tirer de ces lois des conséquences relatives à l'univers, sans la plus grande prudence. Les lois connues doivent se combiner avec tant d'autres que nous ne soupçonnons même pas, qu'on s'exposerait aux plus grandes erreurs en voulant résoudre à l'aide de ces lois seules des problèmes tels que celui de l'avenir des corps célestes. Quelques-unes de nos lois physiques peuvent avoir pour conséquence l'égalité de température de tous les corps, c'est-à-dire un repos effrayant pour notre imagination, sans que cette conséquence, appuyée sur un trop petit nombre de données, ait la moindre

robabilité. Elle n'est ni une conjecture, ni une ypothèse; c'est simplement un jeu de l'esprit, ı solution d'un problème semblable aux mille roblèmes que pose le mathématicien.

Certains phénomènes naturels peuvent présenter es circonstances telles que la loi de la conserva- on de l'énergie s'applique à la chaleur et au tra- ail avec une approximation suffisante. Cela résulte e ce que certaines circonstances sont prépondé- antes, et que les autres sont négligeables. C'est lors que cette loi présente une très-grande utilité, uisqu'elle peut suffire à l'explication et à l'inter- rétation numérique du phénomène; on en fait sage fréquemment dans la théorie de la chaleur.

Pour donner un exemple de l'application de cette ɔi, nous prendrons la machine à vapeur.

VI. Comment la machine à vapeur produit du travail.

Sur la grille de la chaudière brûle le charbon : es atomes s'unissent à ceux de l'oxygène atmo- phérique et il y a une dépense d'énergie, sous forme e chaleur. Une partie de cette chaleur est gagnée ar les corps environnants, par les parois du foyer, ar les gaz qui sortent de la cheminée, etc. ; elle st perdue pour la machine et tous les efforts des ıgénieurs tendent à la diminuer le plus possible. e reste de cette énergie passe dans l'eau de la haudière. Elle y est employée à échauffer et à va-

poriser l'eau. La meilleure chaudière est celle qu prend au foyer la plus grande quantité d'énergie Son rendement est le rapport de cette quantité à l quantité totale d'énergie développée par le com bustible; elle se traduit pour l'industriel par l poids de la vapeur d'eau produite par kilogramm de charbon brûlé.

Suivons cette vapeur dans la machine. En traversant le cylindre et poussant le piston, l'énergie de la vapeur se transmet en partie aux outils par l'intermédiaire des organes mécaniques, tige, balancier, bielle, manivelle, etc., en partie aussi aux pièces qui soutiennent les organes et dirigent leurs mouvements, en partie enfin au condenseur et aux corps environnants sous forme de chaleur.

De la transmission de la première partie résulte le travail utile; de la transmission de la seconde résultent les trépidations, les chocs, les frottements. La meilleure machine est celle où cette portion est la plus petite. Son rendement est le rapport de la première partie à la somme des deux premières. L'indicateur de Watt sert à mesurer cette somme; le frein donne l'énergie utilisée.

Enfin la troisième partie, celle qui est transmise sous forme de chaleur n'est d'aucune utilité pour le fonctionnement des outils ; mais on ne peut l'éviter et tous les efforts tendent à la rendre la plus faible possible. Nos connaissances exactes sur ce point ne datent que d'hier. La théorie mécanique de la chaleur démontre que dans une machine à vapeur à

10 atmosphères, l'énergie ainsi perdue ne peut être inférieure aux $\frac{3}{5}$ de l'énergie totale gagnée par la vapeur dans la chaudière, et elle permet de calculer ce genre de perte, quelle que soit la pression. La perte diminue, quand la pression augmente, mais sans jamais s'annuler ; au-dessus de 20 atmosphères, elle est encore supérieure à $\frac{1}{2}$.

La machine à vapeur est donc loin de convertir en travail toute la chaleur qu'elle dépense. Elle fonctionne toujours plus ou moins comme un calorifère, transportant l'énergie sous forme de chaleur, sans la convertir en travail utilisable. A ce point de vue, la meilleure machine serait celle qui convertirait en travail la plus grande quantité de chaleur, de manière que le rapport de l'énergie transmise aux outils à l'énergie gagnée par la vapeur dans la chaudière fût *maximum*. Ce rapport, qu'on peut appeler *coefficient économique théorique*, se traduit par le travail utile que peut produire la machine par kilogramme d'eau vaporisée.

En tenant compte de la perte d'énergie qui s'opère dans le foyer, on peut calculer le rapport de l'énergie réellement utilisée, à l'énergie totale dépensée sur la grille, et il constitue le *coefficient économique pratique*. Il se traduit pour l'industriel par le travail utile que produit la machine par kilogramme de charbon consommé. C'est ainsi qu'une machine à vapeur qui consomme 2 kilogrammes de charbon par heure pour produire 270000 kilogrammètres (machine d'un cheval-

vapeur), n'utilise que $\frac{1}{25}$ de l'énergie que représente la combustion.

Nous voyons ainsi que l'atmosphère, le charbon, l'eau, les organes de transmission, les outils, les corps environnants prennent part aux opérations qui s'accomplissent dans la machine à vapeur. Une certaine quantité d'énergie passe du charbon à toutes les autres parties du système, et quand on considère tous ces corps dans leur ensemble, l'énergie totale reste constante : mais il y a eu des transformations d'énergie, et de la chaleur a été finalement convertie en travail. Comme cette chaleur provient du travail moléculaire dépensé dans la combustion, on peut dire que ce travail a été converti en partie en chaleur, en partie en travail visible, et que la puissance de la machine dérive réellement de l'attraction mutuelle du charbon et de l'oxygène.

Cette rapide esquisse montre bien l'usage qu'on peut faire des lois que nous avons formulées jusqu'à présent, sans qu'on ait besoin de recourir à aucune hypothèse sur la nature de la chaleur.

VII. Caractères de l'action calorifique. — Le rayonnement.

Nous pouvons déduire de l'étude précédente un premier caractère de l'action calorifique qui s'exerce entre deux corps. L'intensité de la chaleur peut varier entre des limites très-étendues dans chacun

des corps, et elle tend à s'équilibrer entre eux.

Continuons l'étude de cette action, et nous reconnaîtrons à de nouveaux caractères, combien elle diffère de l'attraction.

Disposons sur une même ligne droite trois corps A, B, C, et supposons que A soit une source de chaleur, que B et C soient à la même température inférieure à celle de la source.

Si le corps B est recouvert de certaines substances, telles que le noir de fumée, la source n'agit pas sur le corps C ; celui-ci ne peut s'échauffer qu'après le corps B, par son action directe, dès qu'il existe entre B et C une différence de température. Si le corps B est un morceau de glace, noirci à sa surface, il commence par fondre, sous l'influence de la source, sans que sa température s'élève ; elle reste zéro, et comme par hypothèse C est aussi à zéro, aucune chaleur n'arrive jusqu'à lui. Il semble que le corps B soit un écran qui *cache* la source au corps C.

Mais si le morceau de glace n'est pas noirci, les choses se passent bien différemment.

La source agit directement sur le corps C à travers la glace ; son action est donc transmissible à travers certaines substances.

Taillons le corps B, de manière qu'il ait une face plane, bien polie, du côté de la source. On pourra trouver une position, du même côté, où le corps C recevra encore l'action de la source, mais cette fois ce sera par une *réflexion* sur la face polie.

Pour préciser les circonstances de ce phénomène, nous avons besoin d'une expérience, disposée convenablement.

Nous prendrons pour la source de chaleur A un

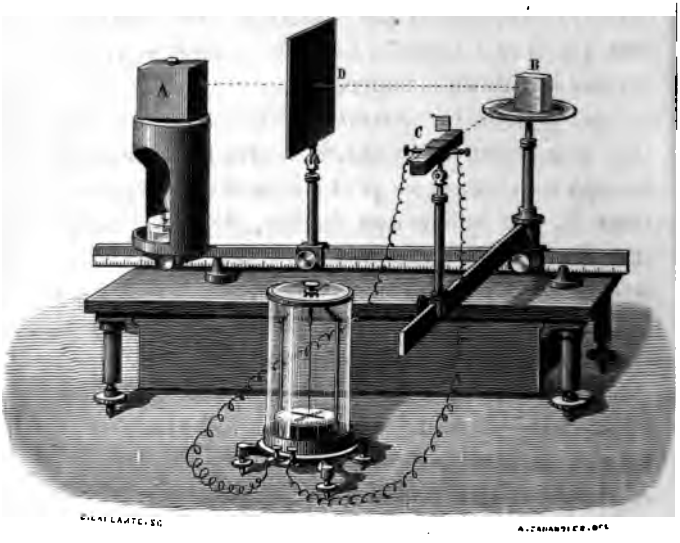

Fig. 15. — Appareil de Melloni.

vase de métal, de forme cubique (fig. 15), contenant de l'eau. Une lampe à alcool, placée au-dessous du cube et cachée aux corps B et C par un écran de métal, maintient cette eau en ébullition, à la température constante de 100°.

Le corps B sera un bloc de sel gemme ayant deux faces parallèles, parfaitement polies, placé de sorte

ue l'une des faces soit tournée vers la source A, t l'autre vers le corps C. Ce bloc de sel va se comorter comme le morceau de glace ; son emploi end l'expérience plus facile.

Enfin le corps C sera la pile thermo-électrique, yant une face tournée vers le bloc de sel gemme. ous savons que l'introduction de la chaleur dans ette pile est révélée instantanément par la déviaon de l'aiguille du galvanomètre.

Un écran de métal D complétera l'appareil. En le ıettant entre la source et la plaque de sel, on supimera l'action de la source ; la plaque de sel et pile prendront la température ordinaire, et l'aiille du galvanomètre occupera une position dérminée. L'expérience est ainsi préparée. Voici aintenant ce qu'on observe.

On supprime l'écran D; instantanément l'aiguille t déviée ; la source agit donc sur la pile à travers bloc de sel. Cette action est presque aussi intense ıe si le sel n'existait pas. Car lorsque l'aiguille a teint une déviation fixe, si on enlève le sel l'aiille est très-faiblement déplacée, indiquant que échauffement de la pile augmente légèrement. oilà la transmission de la chaleur démontrée.

On remet l'écran D ; la pile revient à la tempéture ordinaire, et l'aiguille reprend sa position rimitive. On place ensuite la pile du côté de la ource, de manière qu'elle regarde la même face u sel que la source, et on règle convenablement ı position, suivant une loi connue. On enlève l'é-

cran D ; immédiatement l'aiguille du galvanomètre est déviée, mais moins loin que dans la première observation. L'action de la source sur la pile s'exerce donc par l'intermédiaire du sel, elle est réfléchie.

On comprendra sans peine qu'il soit possible de mesurer à l'aide de l'appareil précédent la chaleur que le corps B reçoit de la source, celle qu'il transmet, celle qu'il réfléchit, enfin celle qu'il conserve, et de vérifier que la première de ces quantités est égale à la somme des trois autres ; ce qui est une conséquence du principe de la conservation de l'énergie.

Ainsi se trouve démontré un caractère remarquable de l'action calorifique. Elle peut s'exercer entre deux corps, soit à travers l'épaisseur d'un troisième, par transmission, soit par réflexion à la surface de ce troisième corps.

On appelle rayonnement ce mode d'action mutuelle entre deux corps qui n'ont pas la même température, et on dit que le plus chaud des deux corps rayonne de la chaleur vers l'autre. Comme on peut supprimer le rayonnement en interposant un écran entre les deux corps, sur la droite qui les joint, on conclut que l'action calorifique s'exerce suivant cette droite, et on appelle rayon de chaleur toute droite qui va d'un corps à l'autre, lorsqu'elle est libre de tout écran qui arrête l'action.

Lorsque les parties d'un même corps ne sont pas à la même température, et qu'aucune influence extérieure n'intervient, elles échangent de la chaleur,

comme le feraient deux corps séparés, et bientôt la température est la même dans toute l'étendue du corps. Ce phénomène porte le nom de *conductibilité*.

Il est aisé de le rattacher au rayonnement de la chaleur, en considérant que les molécules doivent agir les unes sur les autres, comme le font deux

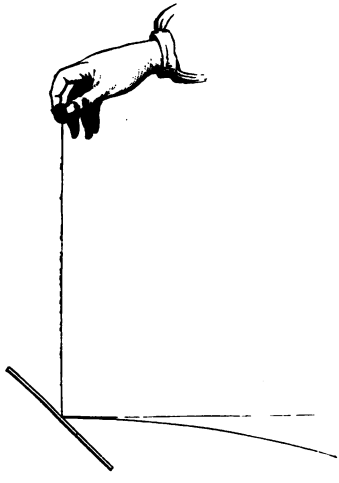

Fig. 16. — Réflexion d'une bille élastique sur un plan incliné.

corps, et rayonner la chaleur dans les intervalles qui les séparent. La conductibilité est donc due au rayonnement moléculaire, ou intérieur, et ses effets peuvent s'expliquer d'après les lois du rayonnement extérieur.

Une observation attentive de la transmission et de la réflexion de la chaleur a fait découvrir de nombreuses et remarquables analogies entre ces

phénomènes et la propagation du mouvement dans une suite de corps. Aussi la connaissance de cette propagation est-elle très-utile pour l'intelligence des lois du rayonnement. Nous ne citerons en ce moment que quelques exemples, choisis parmi les plus simples, nous proposant de revenir à cette question lorsque nous aurons étudié la lumière.

Lorsqu'une bille tombe sur un plan d'acier poli incliné à 45° sur l'horizon (fig. 16), elle rebondit suivant une direction horizontale et, soit avant, soit après le choc, elle se trouve toujours dans un même plan perpendiculaire au plan de marbre. Sans l'action de la pesanteur, elle se mouvrait uniformément en ligne droite, et tracerait dans l'espace *un rayon réfléchi*, tandis qu'en tombant elle traçait le *rayon incident*. On démontre que cet effet est une conséquence des règles connues de la mécanique. Mais la pesanteur fait décrire à la bille une courbe parabolique après la réflexion ; il est aisé de reconnaître que cette ligne courbe résulte de la loi de la réflexion, telle que nous l'avons formulée, et des lois de la pesanteur.

Plaçons une source de chaleur au-dessus du plan d'acier, à la place qu'occupait la bille avant sa chute ; nous verrons que la chaleur est réfléchie comme la bille; car le thermomètre ne s'échauffera que s'il est mis dans la direction de l'impulsion que le choc avait donnée à cette bille.

C'est par la même loi qu'on explique l'expérience des miroirs conjugués (fig. 17). Deux miroirs sphé-

riques de cuivre, polis intérieurement, sont disposés de telle sorte que leurs centres de figure et leurs centres de courbure se trouvent sur une même ligne droite. Une grille pleine de charbons incandescents est placée sur cette droite, près de l'un des miroirs, à égale distance de son centre de figure

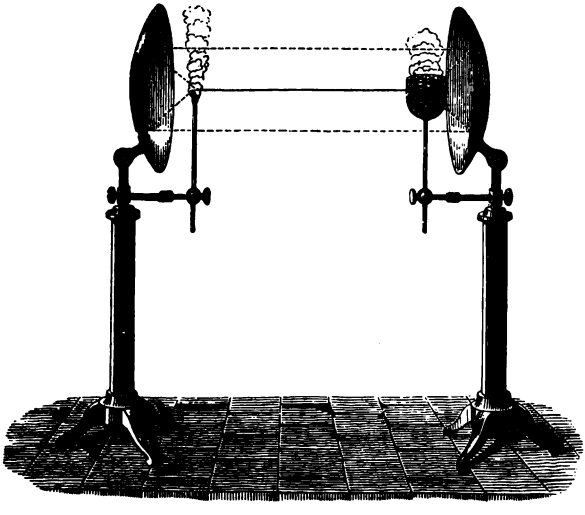

Fig. 17. — Miroirs conjugués.

et de son centre de courbure. Un morceau d'amadou ou de fulmicoton est placé suivant la même règle près de l'autre miroir, et un écran est interposé entre les deux miroirs. Cet écran arrête les rayons de chaleur que les charbons envoient à l'amadou. Dès qu'on l'enlève, ces rayons agissent et le

combustible prend feu. Si l'expérience n'est pas exactement préparée comme nous l'avons dit, elle ne réussit pas. En effet, les rayons de chaleur partis du charbon, puis réfléchis par le miroir voisin, vont tomber sur le second miroir, subissent une seconde réflexion qui les concentre au même point, et c'est en ce point seul que le combustible doit être placé, pour qu'il reçoive toute la chaleur réfléchie.

Otons maintenant les charbons, et mettons à leur place une montre ; puis appliquons l'oreille à la

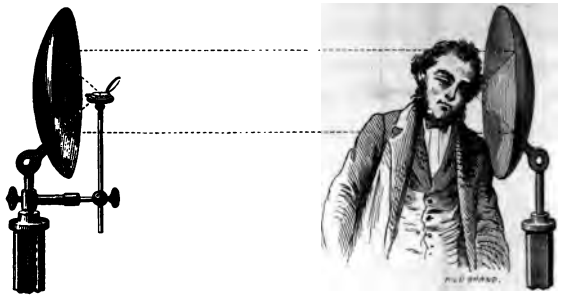

Fig. 18. — Réflexion du son.

place qu'occupait précédemment l'amadou, nous entendrons distinctement le bruit de cette montre, tandis que partout ailleurs nous ne l'entendons pas. Le son se propage donc par réflexion comme la chaleur (fig. 18).

L'analogie se présente aussi dans la transmission. Tout le monde sait qu'une balle rencontrant obliquement la surface de l'eau est déviée de sa direction. On dit que le mouvement est *réfracté*. Le

son et la chaleur se réfractent aussi, en traversant les corps. Ainsi, mettons près d'une source de cha-

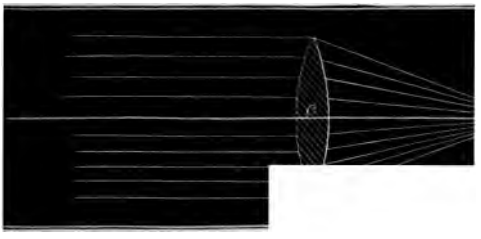

Fig. 19. — Lentille convergente.

leur une lentille de sel gemme (fig. 19), nous trouverons de l'autre côté de la lentille un point où la

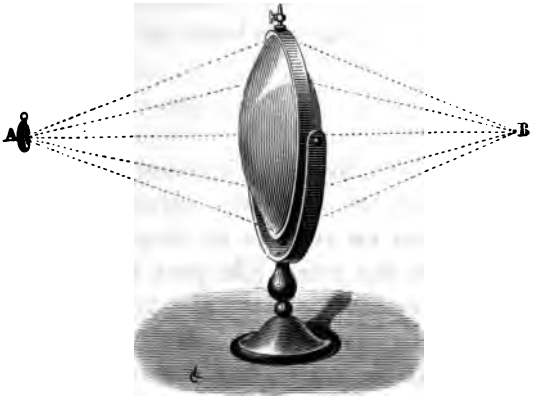

Fig. 20. — Lentille de Sondhaus pour la réfraction du son.

chaleur est concentrée. Le thermomètre placé en ce point s'échauffera beaucoup plus que si la lentille était enlevée.

On peut faire avec le son une expérience semblable.

On prend une sorte d'outre, formée par une membrane très-flexible comme le caoutchouc et la baudruche, et on la gonfle avec du gaz acide carbonique (fig. 20). Elle prend la forme d'une grande lentille. Une montre est alors placée d'un côté, et on écoute de l'autre, en plaçant l'oreille à diverses distances ; on trouve une position B où le bruit de la montre se distingue très-bien, tandis qu'on ne l'entend pas dans toute autre position. On appelle *foyer* le point où se concentre le son ou la chaleur dans cette expérience ou dans celle des miroirs conjugués. Nous reviendrons sur ces phénomènes à l'occasion de la lumière.

VIII. La force calorique.

En résumé, la chaleur, considérée comme effet, nous présente les caractères suivants. Elle peut tenir lieu dans un système de corps d'un travail mécanique et *vice versa*. Elle peut être communiquée d'un corps à un autre, soit à travers le vide, soit à travers certains corps, soit d'une portion à une autre dans le même corps ; elle peut éprouver la réflexion et la réfraction.

Il semble d'après le premier caractère qu'une calorie contenue dans un corps soit la force vive d'un certain mouvement invisible, et qu'elle puisse s'exprimer comme l'attraction à l'aide de certaines

masses et de certaines vitesses. Mais quelles sont ces masses et quelles lois règlent ces vitesses? Ne faut-il considérer que les masses des molécules et leur attribuer ces vitesses, ou bien y a-t-il lieu de subdiviser les molécules, et de leur attribuer une sorte d'atmosphère dont la masse jouerait un rôle spécial dans la chaleur? Ces questions ne sont encore résolues qu'à l'aide d'hypothèses plus ou moins plausibles, et nous ne devons pas nous y arrêter ici. Mais quelle que soit la constitution moléculaire réelle, la cause de ces vitesses ne peut être celle de l'attraction newtonienne et moléculaire, et nous devons appeler cette cause la *force calorique*. Cette force agit dans un corps avec une intensité qui peut varier entre des limites très-étendues ; elle est donc essentiellement variable, tandis que la force gravifique est invariable.

CHAPITRE V

LA LUMIÈRE

I. Les corps lumineux. — La sensation lumineuse.

Les phénomènes de la lumière sont peut-être ceux qui ont été l'objet du plus grand nombre de recherches précises, et qui sont le mieux connus. La beauté des expériences, la simplicité des appareils invitent le physicien à chercher dans les effets de la lumière la satisfaction de l'esprit, qu'il n'acquiert souvent dans d'autres recherches qu'au prix de mille fatigues et quelquefois de dangers. Au dix-septième siècle, Descartes, Newton, Huyghens, puis au commencement de notre siècle, Young, Arago, Fresnel, Biot et tant d'autres ont découvert une foule de lois, qui nous font connaître les phénomènes lumineux avec une étonnante précision. Mais en même temps que les lois étaient formulées, indépendamment de toute conception sur la nature

de la lumière, de nombreuses tentatives étaient faites afin de la découvrir, et les hypothèses les plus opposées trouvaient des partisans convaincus et passionnés. De là des luttes très-vives qui sont à peine éteintes, et dont les autres branches de la physique nous offrent rarement l'exemple. Nous examinerons dans ce chapitre l'ensemble des lois, dans leurs rapports avec les précédentes, et nous nous abstiendrons toujours de figurer la cause de la lumière.

Les corps deviennent lumineux lorsqu'ils sont portés à une température élevée, et tout le monde connaît les expressions, températures du rouge sombre, du rouge, du rouge cerise, du rouge blanc, qui sont comprises entre 500 et 2,000° centigrades. Ces corps émettent donc de la chaleur et de la lumière. D'ailleurs tous les corps n'émettent pas une lumière également intense, à la même température. Ainsi la flamme de l'hydrogène, dans l'expérience de la lampe philosophique, est très-pâle, bien que la température soit très-élevée ; mais si l'on place dans cette flamme un fil de platine, celui-ci devient très-lumineux, bien que la température ne soit pas plus élevée qu'auparavant.

En outre, divers corps n'émettent pas, à la même température, la même sorte de lumière. Quelques traces de sel ordinaire (chlorure de sodium), déposées sur un fil de platine et placées dans la flamme de l'hydrogène, lui donnent une couleur jaune très-intense; un sel de strontiane employé de la même

manière donne une couleur d'un beau rouge, etc. Ce sont ces propriétés des corps qu'on utilise dans les feux d'artifice pour produire de belles flammes aux nuances variées.

Un corps lumineux n'est pas nécessairement à une température élevée. Ainsi le phosphore luit dans l'obscurité et pourtant il reste à la température ordinaire. Il est lumineux lors même qu'on le met dans le vide barométrique, ce qui prouve qu'il ne doit pas cette propriété à sa combinaison lente avec l'oxygène de l'air. On appelle phosphorescence la propriété qu'ont certains corps de luire comme le phosphore dans l'obscurité. Le sucre présente ce phénomène quand on le brise ; l'acide arsénieux cristallisant au sein d'une solution le présente aussi.

La lumière est une sensation que nous éprouvons lorsque les corps placés devant nos yeux sont dans un état particulier ; ils agissent alors sur l'organe de la vision ; ils lui envoient une excitation qui nous révèle leur présencc. Semblablement, le son est une sensation qui suit l'action d'un corps vibrant sur notre oreille. Mais de même que nous pouvons étudier le phénomène du son en dehors de nous, observer les modifications que subissent les corps pour devenir aptes à produire la sensation acoustique, de même nous pouvons étudier la lumière dans les corps et rechercher leurs modifications dans les phénomènes lumineux. Notre œil est l'instrument qui nous permet de juger que certaines

modifications se sont accomplies, et nous augmentons quelquefois sa puissance à l'aide d'appareils. Dans tous les cas, les lois que nous cherchons sont relatives aux phénomènes dont les corps sont le théâtre, abstraction faite de la vision ; elles doivent être intelligibles même pour celui qui n'a jamais vu la lumière.

II. Identité de la chaleur et de la lumière.

Une des lois générales de la lumière, qui réalise un progrès considérable dans la physique moderne, est l'*identité de la chaleur et de la lumière*. Nous expliquerons d'abord le sens de cette loi, en montrant sur quelles observations elle est fondée.

Prenons pour source de lumière le soleil ; considérons plusieurs corps terrestres, et imaginons les lignes droites allant de chacun d'eux vers le soleil. Pendant la nuit, le globe terrestre se trouve interposé sur ces lignes et le soleil n'a pas d'action sur les corps. Mais comme la terre tourne autour d'un de ses diamètres, elle abandonne bientôt ces lignes et à cet instant le jour commence au lieu considéré. Supposons qu'il n'y ait aucun nuage, aucun obstacle sur les lignes qui vont des corps au soleil, voici les phénomènes qu'on observera.

Les corps, devenus visibles, se distinguent les uns des autres par leurs formes, leurs positions, leurs volumes, et aussi par leurs couleurs et

leurs aspects; ce sont ces derniers caractères qui doivent fixer notre attention.

Chacun des corps éprouve une modification superficielle, de laquelle résulte la couleur. Elle est évidemment due à l'action du soleil, et comme cette action s'exerce suivant les lignes droites allant des corps au soleil, on appelle ces lignes *rayons lumineux;* on dit que les rayons solaires tombent sur le corps. D'autre part, comme l'œil de l'observateur voit la surface du corps, pourvu qu'il n'y ait aucun obstacle sur la ligne droite qui les joint, il est naturel de dire que le corps agit sur l'œil en vertu de la modification que les rayons solaires lui ont fait subir, et qu'il envoie des rayons à son tour. Le mot *réflexion* représente cette sorte de phénomène. Nous avons donc à distinguer les rayons *incidents*, qui sont les chemins suivis par une activité particulière émanée du soleil, et les rayons réfléchis qui conduisent une activité émanée du corps éclairé aux corps environnants. Le corps éclairé est ainsi une source temporaire de lumière, tant qu'il est soumis à l'action du soleil; mais il imprime à la lumière qu'il envoie par réflexion un caractère particulier, qui dépend de sa surface. Pour abréger le langage, on dit que les rayons réfléchis diffèrent des rayons incidents, et on attribue au rayon les qualités qui appartiennent en réalité à la lumière qui suit sa direction. C'est donc dans un sens figuré que doivent être prises les phrases telles que celles-ci : un corps rouge en-

voie des rayons rouges ; un corps bleu envoie des rayons bleus, etc.

La réflexion dont nous parlons en ce moment s'effectue dans tous les sens à la surface des corps ; on l'appelle *réflexion irrégulière* ou *diffusion*. Il y a en effet une seconde sorte de réflexion en vertu de laquelle les corps polis présentent un éclat très-vif, quand l'observateur est convenablement placé.

Considérons, parmi les corps exposés au soleil, une plaque de métal parfaitement poli. En le déplaçant peu à peu, on pourra lui donner une position telle que l'on voie une image éclatante du soleil derrière ce plan, dans la direction des rayons qu'il envoie à l'œil. De plus, un corps quelconque, mis à la place de l'œil, sera fortement éclairé par le plan. Les rayons réfléchis qui produisent cet effet ont des directions déterminées par rapport à celles des rayons incidents (comme le représente la figure 16). Le rayon incident et le rayon réfléchi qui se correspondent sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante, et de plus ils sont également inclinés sur cette surface. Telle est la loi *de la réflexion régulière* ou *spéculaire*, qui sert à expliquer tous les effets des *miroirs*.

Il est à remarquer que les rayons réfléchis régulièrement ne subissent pas de la part du miroir les mêmes modifications que les rayons diffusés. Ils sont à peine colorés, lors même que le miroir est formé par une substance qui paraît fortement colorée par diffusion. Ainsi les rayons solaires ré-

fléchis régulièrement par une plaque d'or poli sont presque incolores, et pourtant la couleur de l'or vu par diffusion seulement, celle de l'or en poudre impalpable, telle qu'on peut l'obtenir par les procédés chimiques, est le rouge.

Voici maintenant ce que nous observerons derrière les corps.

Les uns projettent une ombre, ce sont les corps opaques ; les rayons solaires ne les traversent pas. Avec un corps noirci par de la fumée, la réflexion régulière est nulle, la diffusion elle-même est très-faible: presque toute l'activité des rayons solaires semble anéantie dans le corps.

Les autres envoient des rayons plus ou moins différents des rayons incidents. Tantôt ces rayons sont transmis dans tous les sens, et présentent une couleur distinctive; c'est le phénomène de la *réfraction irrégulière* ou *diffusion par transmission;* les corps qui le présentent sont appelés *translucides;* tel est le verre dépoli. Tantôt les rayons sont transmis dans des directions déterminées, et il y a une loi géométrique entre la direction du rayon transmis et celle du rayon incident qui lui correspond, c'est la *réfraction régulière;* les corps qui la produisent sont appelés *transparents :* tel est le verre poli.

Les corps translucides et transparents se distinguent les uns des autres par les modifications qu'ils impriment à la lumière. Lorsque les rayons transmis sont semblables aux rayons incidents, le corps est incolore. Lorsque les rayons transmis sont colo-

'és, le corps est lui-même coloré. Par exemple, une 'euille mince d'or présente la couleur verte par :ransmission; nous avons vu qu'elle présente la :ouleur rouge par réflexion.

Enfin, pour compléter nos observations préliminaires, examinons l'action du soleil sur des corps :ransparents dont la surface est anguleuse, par :xemple sur une carafe pleine d'eau. Les rayons :ransmis sont irisés comme l'arc-en-ciel, et offrent ;ouvent à l'observateur un magnifique spectacle.)n appelle *dispersion* ce genre de phénomènes.

Que résulte-t-il de l'ensemble des faits que nous 'enons de reconnaître? Dans le cas où l'action du ;oleil sur le corps est la plus complexe, il y a des ayons émis par le corps, soit par réflexion, soit ;ar réfraction. Ces deux sortes de rayons diffè-ent entre elles, de même qu'elles diffèrent des ayons incidents: les différences dépendent de la ature du corps.

Il faudrait étudier attentivement chacun de ces hénomènes pour en trouver les lois particulières. 'el n'est pas l'objet de cet ouvrage, et nous choisi-ons parmi les faits connus ceux qui font le mieux aisir les rapports de la chaleur et de la lumière. ious devons maintenant recourir aux expériences, mployer des appareils qui isolent les phénomènes, fin que nous puissions les observer avec détail. ious nous occuperons d'abord de la dispersion.

Vers le milieu du dix-septième siècle, Newton, ilors professeur à l'université de Cambridge, ré-

pétant la célèbre expérience du *spectre solaire*, en découvrit les lois. Au volet d'une chambre obscure, on perce une petite ouverture, et on dirige sur cette ouverture un faisceau de rayons solaires réfléchis horizontalement par un miroir placé hors de la chambre. Les poussières qui sont en suspension dans l'air sur le trajet du faisceau réfléchissent çà et là les rayons et rendent le faisceau visible de toutes les parties de la chambre. Le faisceau rencontre un prisme de verre, dont l'un des angles est tourné vers le bas, près du sommet de cet angle. Les rayons transmis par le prisme sont déviés vers le haut, et s'étalent en éventail avec de magnifiques couleurs. En recevant ces rayons sur un écran blanc, on distingue les couleurs suivantes[1] :

Violet, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge*.

On conclut de cette expérience que les rayons solaires sont composés de sept groupes de rayons distincts, qui arrivent du soleil, mêlés ensemble dans certaines proportions. Les rayons de chaque groupe ont pour caractères distinctifs la couleur qu'ils peuvent produire par leur action sur l'œil, et la déviation qu'ils éprouvent par la réfraction. Cette déviation va en croissant du groupe des rayons rouges au groupe des rayons violets; on dit que la *réfrangibilité* des rayons croît depuis le rouge jusqu'au violet.

[1] Voy. la description et la figure de ces expériences dans *la Chaleur* (Bibl. des Merveilles.)

Les rayons de chaque groupe sont dits *simples*, parce qu'il est impossible de les décomposer en rayons de couleurs différentes, comme on le prouve en faisant tomber sur un second prisme un pinceau de lumière provenant de l'un des sept groupes sortis du premier.

La loi de la composition de la lumière solaire a été soumise par Newton à un grand nombre d'épreuves qui l'ont justifiée, et elle est l'expression d'une vérité physique indépendamment de toute hypothèse sur la nature de la lumière.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la chaleur se réfléchissait et se réfractait comme la lumière. Or le soleil est une source puissante de chaleur. Nous pouvons donc imiter avec les rayons de chaleur l'expérience du spectre solaire. Pour décomposer les rayons calorifiques émanés du soleil, on se sert d'un prisme de sel gemme, et on reçoit les rayons à la sortie du prisme sur une petite pile thermoélectrique, qui présente une face très-étroite. On la place successivement dans les sept groupes de rayons lumineux. Voici ce qu'on observe : la chaleur réfractée croît depuis le violet jusqu'au rouge; si l'on porte ensuite la pile au delà du rouge, toujours sur le prolongement du spectre, on trouve encore de la chaleur, et elle est plus intense que celle qui se trouvait dans le spectre. On conclut de là que les rayons calorifiques du soleil sont décomposables en rayons simples, distincts les uns des autres par leur intensité et leur réfrangi-

bilité, et que le prisme de sel gemme donne un spectre calorifique en partie superposé au spectre lumineux, mais beaucoup plus étalé.

Faut-il admettre que les rayons calorifiques et les rayons lumineux sont simplement juxtaposés, qu'ils ont chacun leur individualité, ou bien que chaque rayon émané du soleil apporte une activité unique qui produit à la fois la chaleur et la lumière?

Pour résoudre cette question, on a mesuré avec précision les modifications que subissent les rayons calorifiques et les rayons lumineux, lorsqu'ils sont réfléchis ou réfractés, dans une foule de circonstances, et on a reconnu que toute modification d'un rayon lumineux entraîne une modification identique dans le rayon calorique concomitant. Aux phénomènes variés de l'optique corrrespondent des phénomènes de chaleur suivant exactement les mêmes lois, de sorte qu'il n'y a aucune raison de supposer que les rayons de chaleur et de lumière soient distincts.

Au contraire, tout s'explique et s'enchaîne avec une remarquable simplicité, lorsqu'on admet l'*identité* des deux sortes de rayons.

Un rayon simple, suffisamment réfrangible, apporte aux corps la chaleur et en même temps les rend aptes à produire les effets lumineux, c'est-à-dire à agir sur notre œil d'une manière déterminée. Ainsi un rayon rouge simple détermine dans un bloc de verre ordinaire une modification telle, que

ce dernier devient le lieu de phénomènes calorifiques, et qu'en outre son action sur notre œil y cause la sensation de la lumière rouge. Un rayon plus réfrangible que le rouge produit moins de chaleur, et une autre couleur. Un rayon moins réfrangible au contraire produit plus de chaleur ; mais la modification du corps n'est plus capable de lumière. Le corps subit toujours le même genre de modification, quel que soit le rayon incident ; mais les modifications ont divers degrés, et c'est seulement de leur degré que dépend la sensation optique. En d'autres termes, notre œil n'est impressionnable que par les rayons suffisamment réfrangibles.

Les efforts des physiciens doivent évidemment tendre à découvrir quelles sont les modifications moléculaires que subissent les corps, dans les phénomènes de la chaleur et de la lumière. Mais cette recherche ne peut être entreprise à l'aide des expériences directes ; il faut avoir recours au raisonnement, imaginer un état moléculaire capable de produire les phénomènes observés, et regarder la théorie ainsi édifiée comme une hypothèse provisoire. Il importe de remarquer le caractère conjectural de ce genre d'explications.

Il est probable que les molécules d'une source de lumière possèdent un mouvement périodique assimilable à une oscillation, et que le rayonnement d'une source vers un corps est une action pouvant s'exercer à toute distance, grâce à un inter-

médiaire inconnu, et excitant dans le corps un mouvement analogue à celui qui a lieu dans la source. Nous verrons dans le dernier chapitre comment une hypothèse permet d'enchaîner entre eux les phénomènes de la réflexion, de la réfraction, de la dispersion, et en général tous ceux qui dépendent de la lumière. Mais lorsqu'on veut s'abstenir de toute hypothèse, il faut simplement énoncer comme des vérités physiques les propositions suivantes :

Les rayons de chaleur et de lumière sont de diverses espèces ; la variété des sources s'explique alors par la diversité des rayons qui en émanent ; le moyen d'étudier expérimentalement cette diversité consiste à décomposer le mélange de rayons venus de la source à l'aide d'un prisme. Ainsi lorsqu'on reçoit sur un prisme la lumière d'une source autre que le soleil, on ne trouve habituellement au delà du prisme que certains groupes de rayons. Le spectre offre l'apparence d'un spectre solaire dans lequel on aurait supprimé quelques parties et renforcé quelques-unes des autres.

Les rayons d'une source rencontrant un corps, celui-ci acquient et conserve une certaine quantité d'énergie ; puis il émet des rayons vers les autres corps, soit par réflexion, soit par réfraction, de sorte que le reste de l'énergie venue de la source se trouve transmise par le corps. Les rayons absorbés, réfléchis, réfractés, sont d'espèces et en proportions différentes, suivant la nature de la source et

celle du corps; la direction des rayons réfractés en dépend aussi.

On exprime simplement ces faits, en disant que tel corps a un pouvoir absorbant, un pouvoir réflecteur, et un pouvoir transmissif, qui sont tous les trois déterminés pour chaque sorte de rayons. Ce langage a l'avantage de rappeler les faits observés, sans qu'on ait besoin de se figurer la constitution des corps, ce qui suffit pour les applications de la physique.

Ainsi le verre ordinaire absorbe les rayons obscurs, ceux qui sont moins réfrangibles que le rouge, tandis qu'il transmet, sans absorption notable, les rayons lumineux. Les verres colorés absorbent certaines espèces de rayons lumineux et transmettent les autres. Un verre rouge, recevant les rayons solaires, absorbe tous les rayons autres que le rouge. Les corps opaques absorbent toute espèce de rayons lumineux, au moins quand ils ont une épaisseur assez grande; car des lames très-minces de tels corps sont transparentes.

Tout ce qui vient d'être dit relativement à la lumière nous apprend que les sources lumineuses sont des centres d'activité, qui créent l'énergie sous la forme de chaleur, et qui la rayonnent ensuite vers les corps environnants, dans lesquels elle se distribue et se transforme. Sous l'influence de cette activité, des rapports particuliers s'établissent entre tous les corps de la nature; on peut dire que leur rayonnement est une révélation mutuelle. La force

qui met ainsi en mouvement les molécules des corps, à des distances immenses de la source, a un caractère bien distinct de l'attraction. Outre la variabilité de son intensité, qui peut être temporairement suspendue, augmentée ou diminuée, elle diffère encore de l'attraction par *son action révélatrice*. C'est grâce à son intervention que nous avons la connaissance des corps que nous ne pouvons approcher, que nous pouvons contempler et étudier les splendeurs de l'univers.

III. Transformations de l'énergie opérées par les rayons solaires.

Mais en laissant de côté le point de vue subjectif, arrêtons-nous pendant quelques instants devant le magnifique spectacle du mouvement engendré par le rayonnement solaire sur les corps terrestres. Suivons quelques-unes des transformations qu'il détermine, en prenant pour exemples les phénomènes lumineux dont la variété est infinie, et dont les lois sont plus accessibles à notre investigation que celles des phénomènes calorifiques, grâce à la sensibilité exquise de l'organe que Dieu nous a donné.

Déjà nous avons vu quel rôle important joue l'énergie retenue par les corps sous forme de chaleur sensible ou de travail moléculaire. L'énergie créée dans le soleil est portée par les rayons de cet astre jusqu'aux dernières particules des corps; elle

y apparaît sous forme de travail, dans la fusion, la vaporisation, la dissociation ; elle s'y manifeste par une rupture de l'équilibre des atomes, laquelle est suivie de nouveaux arrangements, de nouvelles aptitudes chimiques dont la photographie nous donne un merveilleux exemple. Sous l'influence de cette énergie, des transformations innombrables s'accomplissent dans les tissus des végétaux, et quelquefois ces transformations ont pour résultat de retenir l'énergie pendant de longues suites de siècles. C'est ainsi que la houille enfouie dans les couches profondes du sol, tient l'énergie en réserve depuis un nombre incalculable de siècles. Dans les âges géologiques passés, d'immenses forêts s'étendaient sur la terre, et les rayons solaires y accomplissaient le travail moléculaire qui fournissait aux végétaux le carbone et l'hydrogène nécessaires à l'élaboration de leurs tissus. Puis plus tard, les circonstances ayant changé, ces végétaux se sont trouvés recouverts par les eaux, et de leur destruction sont résultées les houillères. Aujourd'hui lorsque nous brûlons ces combustibles, nous utilisons une partie de l'énergie créée par le soleil il y a des milliards de siècles. C'est encore, sous une nouvelle forme, la conservation de l'énergie ; toute l'énergie actuellement en réserve dans les corps terrestres sera peu à peu mise en activité et employée intégralement à de nouvelles transformations.

Quant à l'énergie transmise par réflexion ou réfraction, elle va opérer dans les corps qui ne sont

pas soumis à l'action directe du soleil des transformations analogues, et c'est par cette transmission que s'établit une tendance à l'équilibre entre tous les corps. L'attraction universelle règle leurs distances; le rayonnement règle la quantité d'énergie que chacun d'eux possède à chaque instant: mais pendant les déplacements qu'ils subissent en obéissant à l'attraction, leur quantité d'énergie varie à chaque instant, de sorte que l'équilibre ne s'établit jamais et que le soleil est une cause incessante de mouvements dans leur intérieur.

Parmi les phénomènes lumineux, ceux qui frappent le plus souvent l'attention s'expliquent par les lois de la réflexion, de la réfraction et de la dispersion. Les jeux de lumière que nous aimons à contempler sont habituellement des conséquences rationnelles de ces lois ; ils dépendent des formes, de l'état des surfaces éclairées, des absorptions électives que les corps exercent sur tel ou tel groupe de rayons lumineux. Nous choisirons comme exemple l'arc-en-ciel, dont l'explication est due à Newton, et qui réalise un immense spectre solaire.

IV. L'arc-en-ciel.

Par une belle journée d'été, vers quatre heures du soir, alors que les rayons solaires commencent à être très-inclinés sur l'horizon, placez-vous devant un jet d'eau en tournant le dos au soleil; vous verrez un arc-en-ciel autour du jet, dans la région

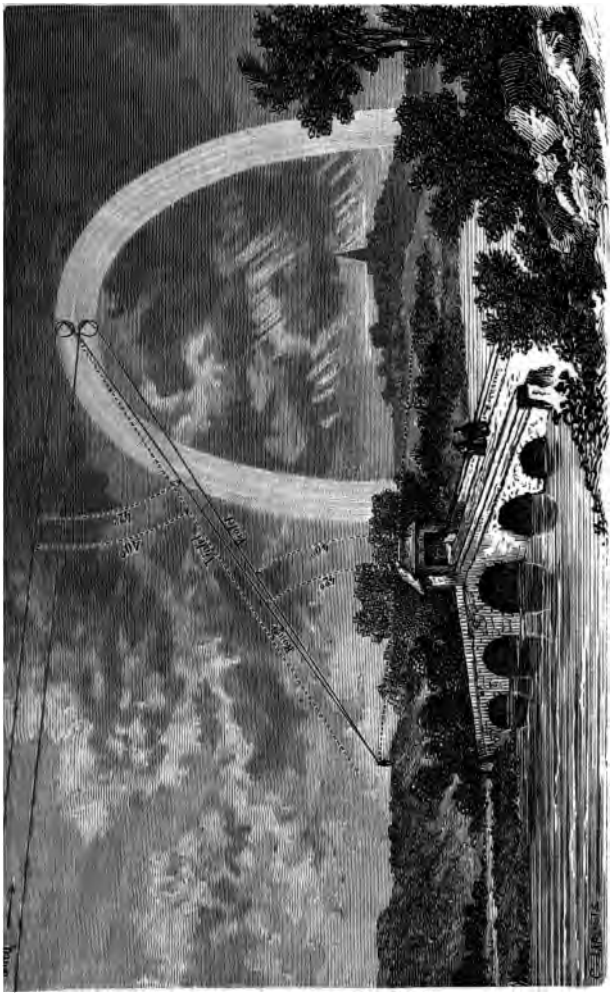

Fig. 21. — Arc-en-ciel.

les gouttelettes d'eau retombent vers la terre.
circonstances sont les mêmes, toutes les fois
vous voyez un arc-en-ciel parer l'atmosphère
ses vives couleurs. Vous l'apercevez, en tournant
los au soleil, lorsque celui-ci est peu éloigné de
orizon, et la région dans laquelle l'arc irisé
ıble se déployer est occupée par d'innombrables
ıttes d'eau qui tombent d'un nuage sous forme
pluie. Pour avoir l'explication de ce phéno-
ne, il suffit d'étudier la figure 21, dans la-
elle on a représenté ce qui se passe dans une
utte d'eau située au point le plus élevé de
rc.

Un rayon solaire atteint la petite sphère liquide,
pénètre par réfraction, se réfléchit au fond de la
ière, puis sort du côté du soleil, en se dirigeant
s l'œil de l'observateur. Mais ce rayon a été dé-
aposé par la sphère d'eau, comme dans l'expé-
ce du spectre solaire, et au lieu d'un seul rayon
a sept rayons simples qui se dirigent vers l'ob-
rateur avec des inclinaisons différentes. L'incli-
son va en croissant du rouge au violet, de sorte
, si le rayon rouge atteint l'œil, les autres rayons
us de la même goutte ne peuvent l'atteindre,
s une goutte moins élevée pourra lui envoyer un
on violet. L'observateur voit donc dans la direc-
t de ces gouttes un point rouge en haut, un
nt violet en bas. Les gouttes intermédiaires en-
ent semblablement à l'œil les rayons simples
apris entre le rouge et le violet. On a ainsi un

spectre solaire, dont les couleurs sont en partant du point le plus bas :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Imaginez maintenant une surface conique, ayant pour axe la droite qui va de l'œil de l'observateur au soleil, et passant par la goutte. Chacune des gouttes d'eau qui se trouvent sur cette surface produit le même effet; on a donc un ensemble de spectres formant une bande circulaire, irisée, dans laquelle les couleurs simples se succèdent suivant l'ordre indiqué, le violet étant en dedans, et le rouge en dehors.

Le phénomène se reproduit tant que les gouttes d'eau se succèdent dans la même région de l'espace ; l'apparence lumineuse se renouvelle en même temps que le passage de ces gouttes, et l'on voit l'arc persister. On démontre par le calcul que l'angle du cône des rayons rouges est de 42°, et celui du cône des rayons violets est 40°. La largeur de l'arc-en-ciel sous-tend donc un angle de 2°, et le diamètre de l'arc total sous-tend un angle de 84°: quant à la largeur apparente de chacune des couleurs simples qui le composent, elle est égale à celle du soleil.

Ainsi l'arc-en-ciel nous révèle l'existence de petites sphères d'eau liquide qui tombent en pluie au milieu de l'atmosphère. Leur grosseur est d'autant plus grande que l'arc-en-ciel est plus brillant. Il faut qu'elles soient beaucoup plus grosses que celles qui forment les nuages pour que l'œil puisse dis-

inguer les couleurs. Voilà pourquoi les brouillards et les nuages ne produisent pas d'arc-en-ciel.

V. Les halos.

Il y a d'autres météores lumineux qui nous révèlent l'existence de corpuscules que nous ne soupçonnerions guère sans ces météores. Par exemple, on voit quelquefois, surtout dans les régions boréales, un cercle irisé entourant le soleil ; le rayon de ce cercle paraît sous un angle de 22° environ ; contrairement à l'arc-en-ciel, l'auréole présente le rouge en dedans et le violet en dehors ; on l'appelle halo. On explique ce météore en admettant que l'atmosphère contient des aiguilles de glace cristallisée, ayant la forme de prismes hexagonaux réguliers (fig. 22). Prolongez par la pensée trois faces alternatives de ce prisme, vous aurez un prisme triangulaire dont les angles sont de 60°. Par conséquent, vous comprendrez comment un faisceau solaire pénétrant dans le cristal par la face A, de manière qu'il sorte par la face B, produira un spectre, comme dans l'expérience de Newton : de plus vous savez que les rayons rouges sont les moins déviés.

Dès lors supposez qu'il y ait dans la direction du soleil OS, un nombre considérable de petits prismes de glace flottant dans l'atmosphère et soutenus par les courants d'air, malgré leur poids. Il y en aura toujours qui dévieront vers votre œil O les

rayons qu'ils reçoivent du soleil. L'un de ces prismes, tel que A, enverra les rayons violets, qui sont les plus déviés, mais les autres rayons venus du même prisme n'arriveront pas à l'œil. Un autre prisme C, placé plus près de la direction OS du soleil, enverra les rayons rouges qui sont les moins déviés, de sorte que A vous paraîtra un point violet, et C un point rouge. Entre ces deux prismes il y en a d'autres qui vous offriront les cinq autres couleurs simples ; vous verrez donc entre A et C un spectre, dont le rouge est plus rapproché du soleil que les autres couleurs. Enfin, imaginez un cône ayant pour axe la droite OS qui va de votre œil au soleil et dont la surface passe par le point A. Tous les prismes voisins de cette surface produiront le même effet, et vous verrez l'auréole irisée, avec le rouge en dedans et le violet en dehors. On a calculé que l'angle du cône AOS doit justement être de 22°, si le prisme est formé par la glace, et s'il a un angle de 60° ; ce qui assure l'exactitude du raisonnement.

Il existe d'autres météores lumineux qui nous révèlent beaucoup d'autres particularités de l'atmosphère, et il ne faut pas croire que toutes les auréoles irisées que nous voyons autour des astres sont dues aux mêmes circonstances. Je citerai par exemple celles que nous voyons fréquemment autour de la lune, à travers de légers brouillards. Celles-là présentent bien, comme les halos, le rouge en dedans. Mais l'angle sous lequel on voit leur

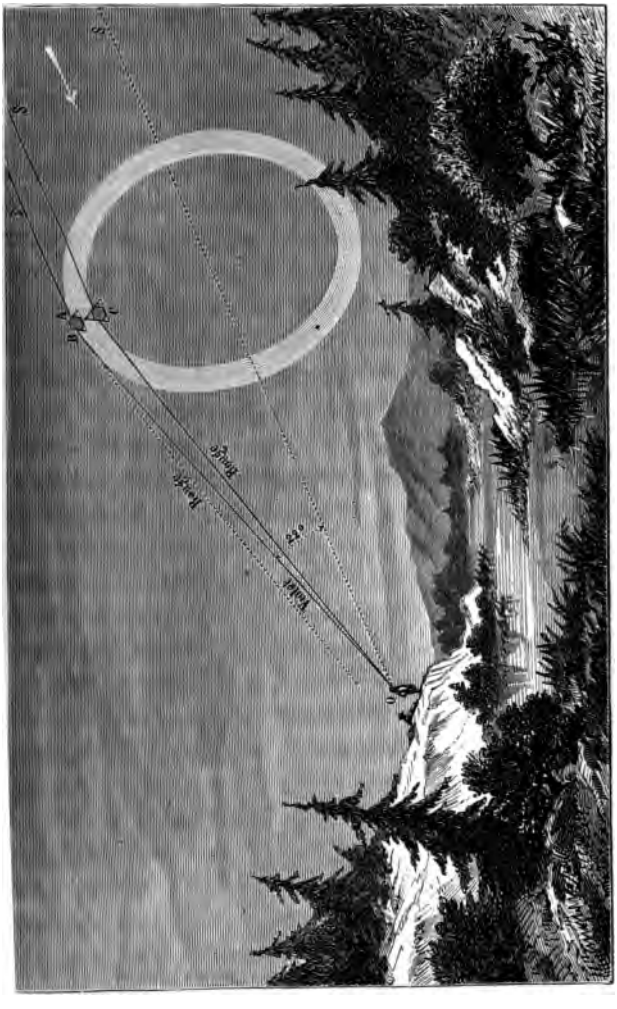

Fig. 22. — Halo.

ayon n'est plus de 22°. Ces auréoles ressemblent à elles qu'on observe autour de la flamme d'une ougie, en la regardant à travers une lame de verre aupoudrée de lycopode, ou bien simplement avec es yeux humides, comme cela nous arrive quelquefois, quand nous nous éveillons. Dans l'atmophère, les globules d'eau qui forment les nuages roduisent ce phénomène, lorsqu'ils sont assez pets et convenablement espacés. Son explication e repose plus sur les lois de la réflexion, de la éfraction et de la dispersion seulement; il faut recourir à un autre principe d'optique, qui a servi de oint de départ à notre illustre Fresnel pour établir ne admirable théorie des phénomènes lumineux, nbrassant tous les faits connus et conduisant à en découvrir de nouveaux. L'importance de ce principe pour la comparaison de la lumière avec les utres forces naturelles est si grande, que j'essayerai d'en donner l'idée, à l'aide d'une expérience 'Arago.

VI. Principe des interférences. Merveilles d'une bulle de savon.

On se sert d'une plaque de verre AC (fig. 23) dont une des faces est plane et dont l'autre est formée ar deux plans qui font entre eux un angle voisin e 180°; puis on regarde à travers le sommet de cet ngle une ligne de lumière simple, par exemple la gne droite qui forme le foyer d'une lentille cylinrique. Cette ligne étant placée parallèlement à

l'arête de l'angle, on distingue dans l'espace des lignes alternativement brillantes et obscures, qui sont parallèles à la ligne lumineuse ; on les appelle franges d'interférence (fig. 23).

L'ensemble de la plaque constitue un assemblage de deux prismes réunis par leurs bases. Dès lors il est évident que le même point B de l'œil peut recevoir deux rayons provenant de la même source lumineuse, dont l'un SAB a traversé l'un des prismes, tandis que l'autre SCB a traversé l'autre prisme.

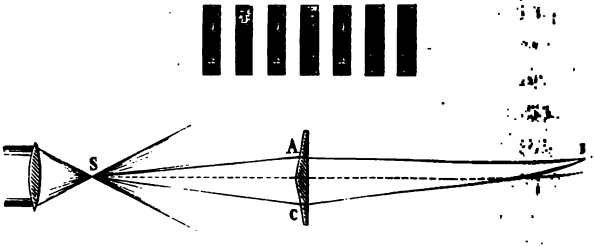

Fig. 23. — Expérience d'interférences.

Suivant la position du point de l'œil B que l'on considère, la différence des chemins SCB, SAB a telle ou telle valeur, et les actions des deux rayons se détruisent ou s'ajoutent. Dans le premier cas, il n'y a pas de lumière; dans le second, la lumière est au contraire renforcée. Nous apprenons donc par cette expérience que deux rayons qui aboutissent au même point, dans certaines circonstances, s'y éteignent complétement comme lumière. On dit qu'ils *interfèrent* entre eux.

Ce fait est une conséquence très-simple de la ropriété qu'auraient les rayons d'imprimer aux nolécules des corps certains mouvements. Il suffit ue les deux rayons interférents tendent à donner une molécule des mouvements égaux et conraires, pour que la molécule reste en équilibre et

Fig. 24. – Couleurs d'une bulle de savon.

u'elle ne puisse pas produire la sensation de la lumière. Tel est *le principe des interférences* de la lumière; nous n'entreprendrons pas de l'appliquer ci, mais nous indiquerons quelques-uns des brillants phénomènes qui s'y rattachent.

Soufflez une bulle de savon à l'extrémité d'un tube à robinet, au milieu d'un bocal de verre (fig. 24) afin de la soustraire à l'agitation de l'air et à l'évaporation, et fermez le robinet pour que la contractilité de la pellicule liquide ne chasse pas peu à peu l'air qu'elle emprisonne : vous pourrez conserver la bulle pendant très-longtemps, afin de l'observer attentivement.

Lorsque la bulle n'est pas très-grosse, on aperçoit par réflexion, à son sommet, autour du bord du tube qui la soutient, une suite d'anneaux irisés concentriques. Les anneaux présentent le rouge en dedans ; le premier est beaucoup plus éclatant que les autres, qui apparaissent comme de petites lignes circulaires, serrées les unes contre les autres. Au delà de ces anneaux, la pellicule est rouge violacée, plus loin elle est verte. Quand on regarde à travers la bulle, les couleurs sont inverses ; les parties qui paraissent rouges par réflexion paraissent vertes par transmission, *et vice versa*. Le bas de la bulle présente des zones horizontales alternativement rouges et vertes. Souvent avant que tous ces effets soient devenus permanents, on voit ruisseler à la surface de la bulle des filets rouges et verts, indiquant que le liquide s'écoule peu à peu vers le bas de la bulle, et on conclut de là que l'épaisseur de la pellicule décroît d'abord très-rapidement à partir du tube et qu'elle croît ensuite jusqu'au point le plus bas. C'est lorsque l'épaisseur cesse de varier que les couleurs sont fixes. La réflexion des couleurs d'un

point à un autre de la pellicule produit une sorte de confusion au premier coup d'œil ; mais avec un peu d'habitude on distingue les zones alternatives.

Si l'on grossit la bulle convenablement, les anneaux du sommet s'élargissent, s'étalent, et on en voit de nouveaux se former au bas qui sont moins éclatants. Les zones supérieures vues par réflexion sont alternativement, en partant du tube, vertes, bleues, violettes, rouges, orangées, et les nuances sont d'autant plus vives qu'elles sont plus voisines du sommet. Les effets de la transmission se mêlant à ceux de la réflexion produisent alors une splendide apparence. Il est évident que l'épaisseur de la pellicule a diminué par le gonflement de la bulle et que cette diminution d'épaisseur est liée intimement à l'ordre et à l'intensité des couleurs.

Si l'on continue à gonfler la bulle, les zones alternatives s'éloignent encore du sommet, les couleurs vues précédemment occupent des régions plus basses, et à leur place on observe, à partir du tube, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, le violet. En même temps les anneaux du bas de la bulle sont plus larges, moins nombreux, aux nuances plus vives.

C'est en ouvrant le robinet et regardant le sommet de la bulle par réflexion qu'on saisit le plus facilement la relation des épaisseurs et des couleurs. L'air de la bulle sort par la contractilité de la pellicule liquide ; par conséquent son épaisseur croît graduellement. On voit alors les couleurs sui-

vantes se succéder vers le sommet, avec une intensité décroissante : rouge, violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, pourpre, bleu, vert, jaune, rouge bleuâtre, vert, rouge violacé, vert, etc. Le robinet étant de nouveau fermé, l'équilibre se rétablit, et les petits anneaux irisés apparaissent comme au commencement, serrés les uns contre les autres.

Des couleurs analogues à celles des bulles de savon s'observent dans une foule de circonstances, soit lorsqu'on étend une goutte d'essence de térébenthine sur de l'eau, soit lorsqu'on appuie une lentille de verre très-peu convexe contre un plan

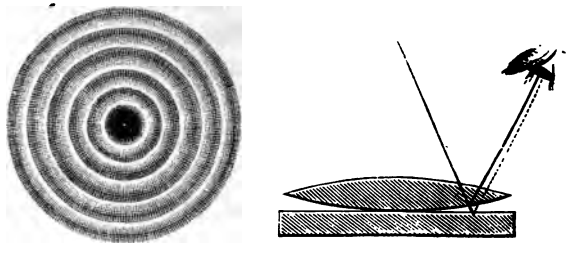

Fig. 25. — Anneaux des lames minces.

de verre, soit lorsqu'une pellicule grasse très-mince couvre une vitre, ou qu'une couche d'oxyde forme un vernis transparent à la surface d'un métal. Une condition essentielle est que la pellicule soit transparente et que son épaisseur soit inférieure à quelques millièmes de millimètre.

Newton a découvert les lois de ces phénomènes, en étudiant les effets produits par une lentille de verre posée sur un plan. C'est la pellicule d'air in-

terposée qui se comporte comme la pellicule d'eau d'une bulle de savon. L'épaisseur de cet air croît très-régulièrement à partir du point de contact, et les anneaux colorés s'observent soit par réflexion, soit par transmission (fig. 25).

Le phénomène est réduit à sa plus grande simplicité lorsqu'on regarde dans la lentille par réflexion la flamme de l'alcool, brûlant autour de quelques parcelles de sel marin. Au lieu d'anneaux irisés, on observe des anneaux jaunes, séparés par des anneaux noirs, et leur nombre peut être considérable. Il est alors évident que les rayons réfléchis aux points qui semblent obscurs se détruisent en arrivant à l'œil, ou, comme on dit, *interfèrent* entre eux.

Considérons un rayon qui pénètre dans l'œil après avoir subi une réflexion à l'extérieur de la couche d'air (c'est le rayon figuré par une ligne pleine, fig. 25) et le rayon qui a subi une réflexion à l'intérieur de la même couche (c'est la ligne ponctuée). Ces deux rayons apportent à l'œil des excitations contraires, qui se neutralisent, lorsque l'épaisseur de la couche est convenable. Tel est le point de départ de la théorie de Newton.

L'épaisseur de la couche qui détermine l'interférence n'est pas la même pour tous les rayons simples. Par conséquent lorsque les rayons solaires sont réfléchis, quelques-uns des rayons simples qui les composent se neutralisent; tandis que les autres au contraire ajoutent leurs effets; de là une

couleur composée, formée par l'assemblage de ces derniers. Supposons que le jaune et le bleu ne se neutralisent pas, et que les cinq autres couleurs spectrales se neutralisent, nous aurons une nuance verte résultant de la superposition dans l'œil des rayons jaune et bleu. Ce raisonnement montre comment les phénomènes en question dépendent de la dispersion et des interférences de la lumière.

Le principe des interférences sert encore à l'explication de la couleur des corps opaques vus par réflexion, comme l'ont démontré Fresnel et plus récemment M. Jamin : celle des corps transparents s'explique plus simplement par l'absorption d'une partie des rayons incidents. Les exemples que nous venons de donner suffisent pour montrer l'importance de ce principe et faire connaître un des caractères essentiels des rayons lumineux. Ajoutons encore que dans ces dernières années, M. Desains a réussi à mettre en évidence les interférences de la chaleur rayonnante, et qu'il a fourni par ses expériences de nouveaux arguments en faveur de l'identité de la chaleur et de la lumière.

VII. La lumière polarisée. Les merveilles d'un morceau de glace.

Il existe d'autres phénomènes lumineux qui dépendent d'autres lois et qui nous révèlent la structure des corps cristallisés. Les rayons qui transmettent l'activité de la source jusqu'aux molécules *mêmes*, les rencontrent groupées suivant la loi de

leur attraction mutuelle, et les mouvements qu'ils leur impriment dépendent de leur arrangement. Lorsque ensuite les mouvements de ces molécules déterminent la vision par leur rayonnement vers notre œil, nous acquérons sur cet arrangement des notions qu'aucun autre genre de phénomène ne pourrait nous donner.

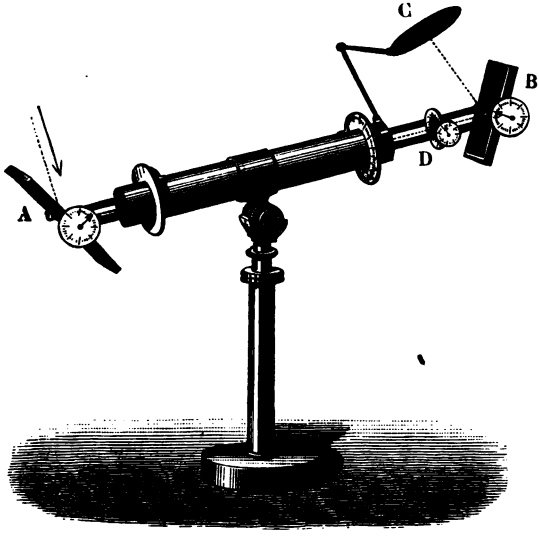

Fig. 26. — Polarisation de la lumière par réflexion.

Bien peu de personnes se doutent, en voyant un morceau de glace, des merveilleux effets qu'il peut produire sous l'action de la lumière. Nous décrirons l'un d'eux, et il nous servira de dernier exemple aussi bien pour compléter notre tableau des

grands phénomènes de l'optique, que pour affirmer de nouveau le caractère d'agent révélateur qui appartient à la lumière.

On dirige un faisceau de rayons solaires sur une lame de verre A (fig. 26), dont la face postérieure est noircie; puis on reçoit le faisceau réfléchi sur une seconde lame B semblable à la première. Cette seconde lame peut tourner autour de la ligne AB qui passe par son centre et par celui de la première, et elle entraîne avec elle un écran blanc C, sur lequel est projetée la trace des rayons réfléchis. A mesure que la rotation s'effectue, voici ce qu'on observe : l'intensité de la trace lumineuse formée sur l'écran est maxima lorsque le rayon incident et les rayons réfléchis qu'il donne sur chacun des miroirs sont dans le même plan. Cette intensité diminue ensuite quand le miroir tourne, et elle devient minima lorsque la rotation est de 90°. Elle peut même être nulle si les inclinaisons des miroirs sur l'axe de rotation AB sont convenables. On arrive ainsi à ce résultat curieux, qu'un rayon réfléchi par un premier miroir peut, en rencontrant un second miroir dans certaines circonstances, cesser d'être réfléchi. On dit qu'un tel rayon est *polarisé*.

L'appareil étant ainsi disposé, plaçons une lentille biconvexe entre les deux miroirs. Les rayons venant du premier sont réfractés par la lentille, et vont se croiser en un point qu'on appelle *foyer*, avant de rencontrer le second miroir. Mettons enfin au foyer D une lame de glace, convenablement tail-

lée, et nous aurons sur l'écran un très-beau phénomène (fig. 27).

Des anneaux concentriques, aux couleurs de l'arc-en-ciel, sont séparés par des anneaux obscurs, et traversés par une croix noire, dont une branche est dans le plan du rayon incident et de l'axe de rotation AB, tandis que l'autre lui est perpendiculaire.

Si l'on ramène le miroir mobile à sa position

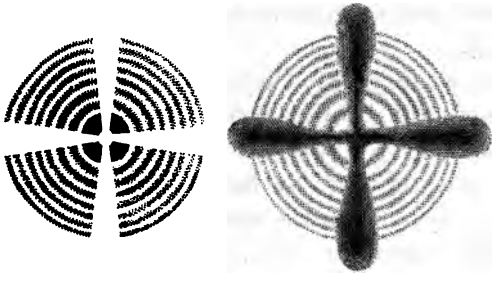

Fig. 27. — Anneaux de la lumière polarisée.

primitive, l'apparence change; les anneaux obscurs deviennent brillants et irisés, tandis que les anneaux colorés pâlissent et deviennent blancs; en même temps la croix noire s'éclaircit et à sa place on finit par avoir une croix blanche (fig. 27).

La même expérience peut être répétée avec divers cristaux, par exemple avec le spath d'Islande; une condition indispensable, c'est que la plaque ait ses faces perpendiculaires à l'axe du cristal, ligne autour de laquelle les molécules sont groupées symétriquement. Cela démontre que le phénomène

est dû à l'orientation des molécules, qui absorbent et transmettent les rayons lumineux dans des proportions différentes, suivant leur position dans le cristal, et aussi suivant la nature de ces rayons.

Les lois de la *polarisation* des rayons lumineux ont été découvertes par Malus, Arago, Fresnel, Brewster, Biot, etc., et elles s'appliquent aux rayons calorifiques, comme le démontrent très-clairement les récentes expériences de M. Desains. Elles conduisent à une connaissance approfondie du rayonnement.

Nous avons vu que l'action d'une source de chaleur ou de lumière sur un corps quelconque s'exerçait suivant les droites qui les joignent, et qu'elle avait pour résultat un mouvement moléculaire. Quand l'action s'exerce suivant un rayon *polarisé*, ces mouvements sont orientés d'une manière déterminée. Si l'on imagine, par exemple, des vibrations rectilignes, la polarisation consiste dans le parallélisme de ces vibrations. Quand au contraire le rayon n'est pas polarisé, les mouvements moléculaires ne sont pas orientés, et ils s'effectuent dans toutes les directions.

Les molécules d'un cristal, étant soumises à leur attraction mutuelle, ont des positions moyennes déterminées, de manière que chacune d'elles soit en équilibre, et elles ne sont pas libres de céder également à une force extérieure dans toutes les directions. Il y a dans le cristal des directions de plus grande et de plus petite élasticité que l'on peut trouver en

observant attentivement toutes les propriétés de ce cristal. Dès lors un rayon polarisé rencontrant les molécules du spath les met plus ou moins aisément en mouvement suivant leur position, et l'orientation de leurs mouvements dépend de la structure du corps. Sans que nous puissions présenter ici l'explication des anneaux de la glace et du spath, nous voulons montrer par ces remarques comment le rayonnement unit entre elles les molécules de deux corps quelconques, quelque grande que soit la distance qui les sépare, tandis que l'attraction newtonienne unit les assemblages de molécules ou corps visibles.

CHAPITRE VI

L'ÉLECTRICITÉ

I. Ce qu'on entend par quantité d'électricité.

Franklin démontra, en 1752, à Philadelphie, que le tonnerre, les éclairs, la foudre, étaient dus à la même cause que les phénomènes connus longtemps auparavant sous le nom de phénomènes électriques. Ses idées sur ce sujet avaient été publiées antérieurement, mais il n'avait pas eu jusqu'alors l'occasion de faire les expériences. Aussi doit-on lui accorder le mérite de cette découverte, bien que les premières expériences aient été faites en France, à Marly-la-Ville, par d'Alibard, quelque temps avant celles de Franklin.

Plus tard, en 1800, Volta, professeur à Pavie, étudiant une observation fortuite de Galvani, découvrit la pile, qui est le plus puissant de nos générateurs d'électricité.

ès lors, on a découvert une foule de circon-
ces dans lesquelles les corps sont soumis à une
e essentiellement différente de celles qui pré-
ent : on l'appelle *force électrique ;* son action est
i générale que l'attraction newtonienne ou que
aleur et la lumière.
en que la plupart des lois de l'électricité aient
récemment découvertes, la théorie dont on
encore usage généralement pour coordonner ces
n'est guère plus satisfaisante que celles qui ont
maginées au temps de Franklin. Elle est due
hysicien anglais Symmer.
est une théorie tout à fait hypothétique, artifi-
e, et que la véritable méthode expérimentale
lamne. Il faut, en effet, que les lois des phéno-
es soient parfaitement connues, avant qu'on
eprenne de trouver le lien qui les unit, et on doit
stenir jusque-là de toute considération relative
nature intime de la cause des phénomènes. Il
it donc bien désirable que l'on renonçât dans
seignement à la théorie des *fluides électriques*, à
elle personne n'ajoute foi, et dont tout le monde
ert; car il n'est pas impossible de présenter les
dans un ordre rationnel, et de démontrer leur
aînement sans recourir à aucune hypothèse.
ns entreprendre ici un exposé de ce genre, je
simplement choisir parmi les faits connus
qui me paraissent les plus propres à assigner
force électrique son véritable caractère.
emarquons d'abord qu'il convient de ne pas

employer le même mot pour désigner la cause et l'effet, et que malheureusement cette confusion de mots est très-répandue. Ainsi on appelle *chaleur*, tantôt la cause des phénomènes, tantôt une quantité mesurable en *calories*. Il serait préférable que l'on adoptât dans le premier cas l'expression *force calorique*. Nous suivrons cette règle pour les phénomènes électriques. Le mot *force électrique* désignera la cause inconnue, et le mot *électricité* indiquera une quantité qui est à la force électrique ce qu'une quantité de chaleur est à la force calorifique, ce qu'une quantité de travail est à la force de pesanteur. Nous verrons, en effet, que ces trois sortes de quantités : électricité, chaleur, travail sont susceptibles de s'équivaloir, qu'elles constituent trois formes d'une même grandeur que nous avons déjà appelée *énergie*.

On doit prendre pour unité d'électricité une quantité déterminée par certains effets mesurables, de telle sorte qu'on puisse dire : Un corps reçoit de l'électricité comme il reçoit de la chaleur, du travail, etc. Quand un corps est élevé à une certaine hauteur, il a gagné réellement une certaine quantité de travail ; c'est ce gain qui rend le corps apte à produire certains effets. De même quand un corps est électrisé, il a gagné une certaine quantité d'énergie qui le rend apte à produire les phénomènes électriques.

Voici une première expérience qui peut servir à fixer une unité d'électricité.

Ayez deux petites balles de sureau suspendues chacune à un fil de soie (fig. 28). Approchez de ces balles un bâton de verre, préalablement séché avec soin, et frotté avec un morceau de laine : vous les verrez se précipiter sur le bâton de verre, puis, après l'avoir touché, s'en éloigner rapidement. Otez le bâton de verre, et les petites balles reste-

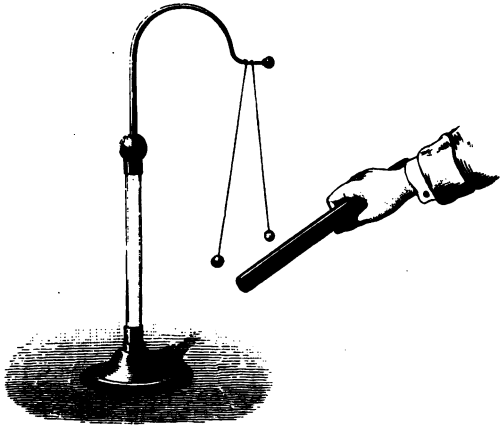

Fig. 28. — Attractions et répulsions électriques.

ront éloignées l'une de l'autre ; ellez exercent une action mutuelle qui est répulsive.

Supposons que chacune de ces balles pèse 1 gramme, qu'un obstacle les maintienne écartées de 1 centimètre, et qu'elles exercent sur cet obstacle une pression égale à celle qu'un poids de 1 gramme exerce sur un obstacle qui l'empêche de céder à l'attraction terrestre. Nous pouvons dire

que chacune de ces balles contient *l'unité d'électricité.*

II. Les deux espèces d'électricité.

Nous voyons par l'expérience qui précède que la force électrique produit l'attraction ou la répulsion entre les corps dans certaines circonstances. Il faut maintenant préciser ces circonstances.

Touchons l'une des balles de sureau avec un bâton de verre frotté avec de la laine, et l'autre avec un bâton de résine frotté aussi avec de la laine, nous verrons les deux balles s'attirer mutuellement. La quantité d'électricité que la seconde a gagnée dans cette expérience diffère donc de celle qu'a gagnée la première par le sens des effets qu'elle peut produire. On appelle *électricité positive* la quantité donnée par le verre, et *électricite négative* la quantité donnée par la résine.

On peut faire les deux expériences précédentes en remplaçant la résine et le verre par un grand nombre de corps ; les propriétés dont il s'agit ne sont donc pas particulières à ces deux substances ; ainsi, le soufre frotté avec de la laine développe de l'électricité négative ; le papier frotté avec de la soie développe de l'électricité positive. Le signe de l'électricité dépend de la nature des corps que l'on fait frotter l'un contre l'autre.

Nous concluons de ce qui précède deux lois fon-

damentales : 1° deux corps qui possèdent la même espèce d'électricité se repoussent ;

2° Deux corps qui possèdent des électricités différentes s'attirent.

Frottez, l'un contre l'autre, deux plateaux de verre, dont l'un est poli et l'autre dépoli (fig. 29), une petite balle de sureau électrisée positivement sera repoussée par le plateau poli et attirée par le plateau

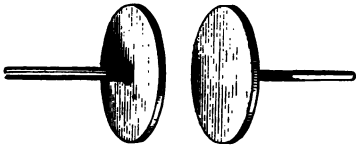

Fig. 29. — Disques de verre pour l'électricité.

dépoli. Donc, le premier est électrisé positivement et le second négativement. De là une troisième loi :

Lorsque l'électricité apparaît dans un système de corps, une partie du système prend l'électricité positive et l'autre partie prend l'électricité négative. On conçoit qu'on puisse démontrer par l'expérience que les deux électricités se trouvent dans le système en quantités égales.

Le frottement est une opération dans laquelle on perd une certaine quantité de travail, et on crée de la chaleur. Nous avons cité dans le chapitre III des expériences où la chaleur créée était proportionnelle au travail disparu, et nous disions alors que le travail était converti en chaleur. Les corps mis en présence dans ces expériences dif-

fèrent beaucoup du verre et de la résine; ils ne deviennent pas comme eux des sources d'électricité, dans les mêmes circonstances. Il est donc naturel de penser que, par le frottement de certains corps, tels que le verre et la résine, le travail n'est converti en chaleur que partiellement, et que le reste est converti en électricité.

On a reconnu que les corps se divisent en deux classes, au point de vue de leurs propriétés électriques. Lorsqu'un corps de la première classe reçoit une quantité donnée d'électricité, elle se distribue très-rapidement dans toute son étendue; c'est la classe des corps *bons conducteurs de l'électricité*, ils sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur; tels sont les métaux. Lorsque l'électricité se distribue au contraire lentement dans un corps, il appartient à la seconde classe, celle des corps *mauvais conducteurs;* ceux-là conduisent mal la chaleur. Tels sont le verre, la résine, le soufre, le caoutchouc, l'ambre, qui est la substance sur laquelle on a observé les premiers phénomènes électriques, et dont le nom grec a servi à l'invention du mot *électricité.*

Les corps bons conducteurs ne peuvent conserver l'électricité que lorsqu'ils sont supportés par des corps mauvais conducteurs, tels qu'un fil de soie, une tige de verre; on dit qu'ils sont *isolés*. Lorsqu'un objet n'est pas isolé, il constitue avec le globe terrestre un immense conducteur dans lequel l'électricité peut se répandre très-rapidement, de sorte

que le corps n'en conserve qu'une quantité inappréciable.

Poursuivons maintenant notre étude des phénomènes électriques.

III. La polarité électrique.

Approchons un corps électrisé A (fig. 30) d'un corps conducteur isolé B, portant de petites balles

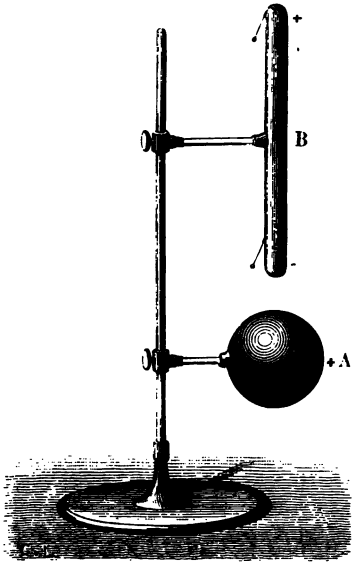

Fig. 30. — Théorie de l'influence électrique.

de sureau suspendues par un fil à ses extrémités. Nous voyons ces balles repoussées par le corps B.

Nous concluons que tout le système est électrisé par l'influence du corps A. La quantité d'électricité développée par influence croît à mesure que la distance AB diminue; car les balles sont de plus en plus écartées. Mais les électricités sont différentes aux extrémités du corps B. Car un bâton de verre frotté avec de la laine attire l'une des balles et repousse l'autre. Nous pouvons ainsi reconnaître que l'électricité de B est de même nom que celle de la source A au point le plus éloigné, et de nom différent au point le plus rapproché, ce que les signes + et − marqués sur la figure font comprendre.

Ces effets exigent la présence de la source A : enlevons-la, les balles de sureau cessent d'être repoussées par le corps B, et l'électricité disparaît de ce corps. L'action par influence est donc temporaire; les quantités d'électricité qu'elle développe sont égales et de signes contraires; elles se *neutralisent* d'elles-mêmes dès que l'influence cesse.

Remettons la source près du corps, l'écartement des balles reparaît. Lorsque la distance de la source et du corps est assez petite, une étincelle brillante apparaît, et l'on entend un bruit sec. Enlevons de nouveau la source, et nous verrons que le corps B est électrisé définitivement; une certaine quantité d'électricité a disparu de la source, et une quantité égale et de même signe a été gagnée par le corps B. Aussi dit-on que la source a communiqué au corps une partie de son *électricité*.

Ce phénomène a été soumis à des expériences précises par Coulomb, et l'on sait dans quelles proportions sont les quantités d'électricité de la source et du corps. Plus la surface de ce dernier est considérable, plus la quantité d'électricité qu'il gagne est grande, de sorte que si la source A est très-petite, presque toute son électricité a passé sur le corps B.

Ce cas se présente lorsqu'un corps électrisé bon conducteur vient à toucher le sol; la terre entière joue alors le rôle du corps B, et élle gagne réellement de l'électricité. Mais à cause de l'énorme étendue de sa surface, cette électricité ne se manifeste à nous par aucun effet appréciable; elle semble avoir disparu, et on dit qu'elle s'est perdue dans le sol.

On conçoit maintenant pourquoi l'isolement des corps conducteurs est nécessaire, et pourquoi les phénomènes électriques ont si longtemps échappé à l'attention des physiciens. Il a fallu un concours de circonstances fortuites pour que ces propriétés des corps fussent dévoilées. Aussi la découverte des corps conducteurs de l'électricité, qui fut faite par Gray, en Angleterre, vers l'année 1722, eut-elle une grande influence sur les progrès de la physique.

Les conclusions de notre dernière expérience servent à expliquer l'une des précédentes.

En présence du verre frotté, qui est électrisé positivement, la balle de sureau isolée (fig. 28)

prend un certain état, en vertu duquel la partie voisine du verre contient de l'électricité positive, et l'autre partie de l'électricité négative, en quantité égale à la précédente. La première partie est attirée, la seconde est repoussée. Mais comme celle-ci est la plus éloignée, l'attraction l'emporte sur la répulsion, et la balle est attirée. Un peu avant le contact de la balle et du verre, l'électricité négative est neutralisée par une quantité égale d'électricité positive prise dans le verre; il y a une étincelle imperceptible, à cause de la petitesse de la balle; et finalement celle-ci est électrisée positivement dans toute son étendue ; voilà pourquoi elle est repoussée.

Nous appelons *polarité électrique* l'état de la balle avant le contact, ou plus généralement l'état qu'acquiert un corps isolé, lorsqu'il est soumis à l'influence d'une source d'électricité.

IV. Le courant électrique.— Conversion de l'électricité en chaleur.

La disparition de la polarité électrique est accompagnée de phénomènes particuliers que nous allons étudier.

Prenons deux sphères de métal isolées; l'une A, contient de l'électricité positive; l'autre B contient une quantité égale d'électricité négative. Réunissons-les par un fil conducteur isolé. Immédiatement le fil s'échauffe; une aiguille aimantée placée au-

lessous est déviée pendant un instant de sa direction ordinaire. On dit que le fil est traversé par un *courant électrique* temporaire, allant de la sphère positive à l'autre. En même temps les électricités disparaissent; elles se *neutralisent* par l'intermédiaire du fil.

Nous pouvons ramener nos sphères électrisées à l'état naturel d'une autre manière, qui est au fond analogue à la précédente.

Pour cela, rapprochons-les l'une de l'autre. Une étincelle jaillira entre eux, et ensuite les électricités auront disparu. Le phénomène qui se passe alors ne diffère pas essentiellement de la disparition des électricités par le fil conducteur intermédiaire, et nous pouvons le prouver par les observations suivantes.

L'étincelle a une couleur différente, suivant qu'elle jaillit entre deux boules d'argent, ou deux boules de zinc, par exemple. Elle est verte avec les premières, bleue avec les secondes; or ces couleurs sont justement celles des flammes de ces métaux. D'autre part, nous savons que les parties d'un même corps électrisé se repoussent mutuellement; il est donc évident que l'étincelle est constituée par un jet de parcelles métalliques fortement échauffées, qui se détachent des boules, et qui établissent entre elles un conducteur analogue au fil de l'expérience précédente. Ce jet est traversé par un courant électrique, avec création de chaleur, exactement comme l'était le fil conducteur.

Ces considérations nous permettront d'assigner à la cause de l'électricité une caractère analogue à l'un de ceux qui appartiennent à la pesanteur. La pesanteur confère à un corps la propriété de produire du travail en descendant ; mais le corps peut conserver cette propriété, comme une sorte d'aptitude, sans la mettre en usage, lorsqu'un obstacle s'oppose à sa descente ; il y a alors entre le corps et l'obstacle pression et contre-pression. Le seul effet de la pesanteur est cette pression ou *poids*.

De même la force électrique confère à un conducteur isolé une aptitude à produire le courant, laquelle peut rester sans usage, temporairement, jusqu'à ce que les circonstances permettent son emploi. On dit que le corps a une *tension électrique*, tant que son électricité ne produit pas de courant.

De même que le corps pesant produit le travail en tombant vers la terre, c'est-à-dire en obéissant à une action mutuelle qui s'exerce entre lui et la terre, semblablement le corps électrisé produit le courant par une action mutuelle de ce corps sur un autre. Mais ce qui caractérise la force électrique, c'est d'abord que son intensité peut passer par tous les degrés dans un système de corps; c'est ensuite que le système des corps où elle apparaît prend toujours deux états de tension différents qui constituent la *polarité*.

Il est aussi difficile de se figurer la situation des molécules dans l'état positif ou négatif, que leur situation dans un corps chaud ou froid ; on ne peut le

aire qu'à l'aide d'une hypothèse. Or une telle hypothèse n'est pas plus indispensable pour lier les phénomènes de l'électricité que pour lier ceux de la chaleur. Aussi voulons-nous nous en abstenir dans ce chapitre.

V. Principes généraux pour servir à l'explication des phénomènes électriques.

Résumons tout ce que nous venons d'apprendre sur l'électricité en quelques propositions fondamentales, qui ne sont que l'expression des vérités révélées par l'observation.

Deux corps soumis à une opération qui dépense du travail, comme le frottement, peuvent gagner des quantités égales d'électricité ; mais celle de l'un diffère de celle de l'autre, ce qu'indiquent les mots qualificatifs *positive* et *négative*. Lorsque les corps sont séparés après l'opération, ils conservent les électricités à l'état de *tension*, et chacun d'eux est devenu une source temporaire d'électricité.

Une source temporaire d'électricité produit la *polarité électrique* dans tout corps voisin. Les quantités de chaque électricité qui apparaissent dans le corps sont égales entre elles ; elles sont plus petites que la quantité d'électricité de la source, et d'autant plus grandes que le corps est moins éloigné; celle qui apparaît du côté de la source et celle de la source sont de noms différents.

Les corps qui ont des électricités de même nom

se repoussent mutuellement. Ceux qui ont des électricités de noms différents s'attirent.

Les électricités de noms différents peuvent se neutraliser par quantités égales, et disparaître en produisant un courant et créant de la chaleur.

La chaleur totale créée pendant une suite quel-

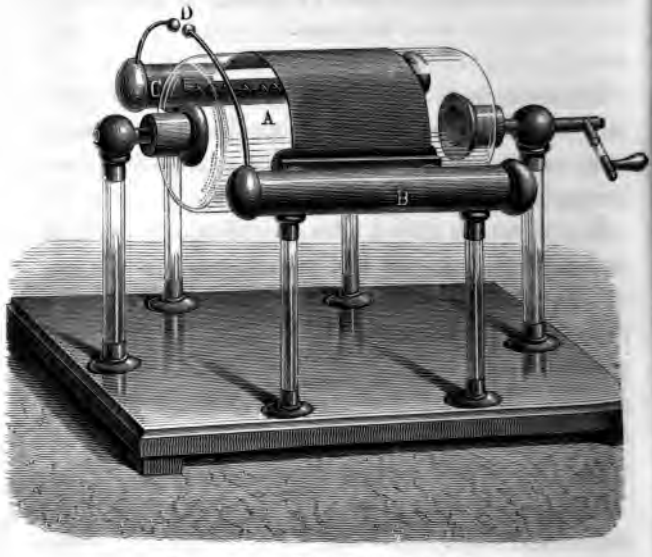

Fig. 31. — Machine électrique de Nairne.

conque d'opérations, qui font finalement disparaître l'électricité, est équivalente au travail primitivement dépensé. Bien que cette dernière proposition n'ait pas été l'objet d'observations directes, elle résulte de la conservation de l'énergie.

Nous citerons comme application de ces principes, une expérience que l'on fait avec la machine électrique de Nairne (fig. 31).

Un cylindre de verre A tourne autour d'un axe horizontal ; il frotte un coussin de cuir recouvert d'or massif et porté par un cylindre de cuivre B, isolé par des pieds de verre. Le frottement électrise positivement le verre, négativement le coussin et le cylindre de cuivre ; le mouvement de rotation amène la surface de verre électrisée dans le voisinage d'un second cylindre de cuivre C armé de pointes, et également isolé. Chacun des cylindres porte une tige de cuivre mobile, et l'on peut rapprocher l'une de l'autre les extrémités D de ces tiges.

De l'électricité négative apparaît aux pointes, et une quantité égale d'électricité positive apparaît sur le cylindre qui les porte. La première neutralise le verre, et cette neutralisation est accompagnée d'une création de chaleur, sous forme de petites aigrettes lumineuses, que l'on voit aux extrémités des pointes, quand on opère dans l'obscurité. La seconde neutralise aussi le conducteur B ainsi que le coussin, en créant de la chaleur, et l'on voit à cet instant une étincelle jaillir en D entre les deux tiges de métal. Après sa neutralisation la surface de verre revient au coussin, et le phénomène continue, tant qu'on tourne la machine. Des étincelles nombreuses et brillantes se succèdent entre les tiges, et des lueurs incessantes apparaissent aux pointes du conducteur C.

Ainsi la chaleur est incessamment créée par ce moyen, et finalement le travail dépensé pour faire tourner le cylindre de verre est converti en chaleur, soit directement par le frottement, soit par l'intermédiaire du courant électrique qui traverse les conducteurs, en passant par le jet de vapeurs métalliques D dont se compose l'étincelle.

On doit remarquer que l'électricité apparaît dans cette expérience d'abord à l'état de tension, puis qu'elle disparaît sous forme de courant, et qu'enfin ces deux opérations successives peuvent se renouveler indéfiniment. Il faut nécessairement que les quantités totales d'électricité successivement créées et détruites aient un rapport déterminé avec le travail dépensé et avec la chaleur créée. On peut dire que le travail mécanique est converti en électricité, et que celle-ci est ensuite convertie en chaleur. Par là on généralise la loi de la conservation de l'énergie.

VI. La batterie électrique.

Si l'on veut conserver temporairement les électricités, afin d'en disposer dans des circonstances variées, on se sert de la batterie électrique, dont l'invention est due à une observation fortuite faite en Allemagne en 1746. Kuneus, élève de Muschenbroeck, voulait électriser de l'eau. Pour cela il avait plongé une tige de métal dans l'eau contenue dans un vase de verre, et il avait suspendu cette tige à

un conducteur isolé, placé à côté d'un globe de soufre. En tournant ce globe, et appuyant la main sèche sur sa surface (fig. 32), on l'électrisait : c'était la machine électrique usitée à cette époque ; le conducteur s'électrisait par influence, et l'élec-

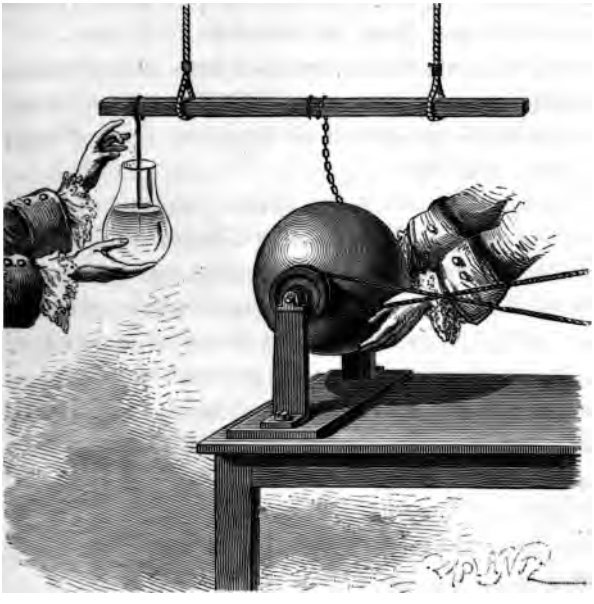

Fig. 32. — Invention de la bouteille de Leyde.

tricité devait se transmettre à l'eau. On était alors peu familiarisé avec les phénomènes électriques et les expériences que l'on tentait étaient bien plus souvent infructueuses que de nos jours. L'expérimentateur ne voyant rien de particulier se

manifester dans l'eau, voulut mettre fin à l'exp rience. Il prit d'une main le vase de verre, et l'autre le conducteur, afin d'enlever le vase; il re sentit à l'instant une commotion violente qui l'e fraya beaucoup. Muschenbroeck, après avoir répé l'expérience, écrivait à Réaumur qu'il ne la recon mencerait pas pour la couronne de France. Ma une découverte inattendue était faite, et en étudia attentivement le phénomène observé, on construis un appareil qui permit de faire une foule d'exp riences nouvelles.

Un bocal de verre est revêtu intérieurement extérieurement d'une feuille d'étain, sans que ce feuilles s'étendent jusqu'au goulot; une tige de mé tal traverse le bouchon qui ferme le goulot et touch la feuille intérieure. Telle est la bouteille de *Leyde*

Plusieurs bouteilles sont rassemblées dans un boîte, dont le fond est tapissé d'étain; leurs tiges d métal sont réunies entre elles par d'autres tiges d métal; telle est la batterie électrique (fig. 33). Ré duite à sa plus simple expression, la batterie es une lame de verre, substance isolante, interposé entre deux feuilles d'étain.

Plaçons cette batterie sur un tabouret à pieds de verre, elle sera isolée. Mettons ensuite la feuille d'étain *ou armature extérieure* en communication avec le conducteur B de la machine de Nairne (fig. 31) à l'aide d'une tige de métal isolée, et la feuille d'étain ou *armature intérieure* en communication avec le conducteur C, à l'aide d'une se-

conde tige de métal s'appuyant sur les traverses métalliques de la batterie; puis tournons la machine.

L'électricité créée va s'emmagasiner dans la batterie, la lame de verre interposée entre les deux armatures s'opposant à la neutralisation. L'armature

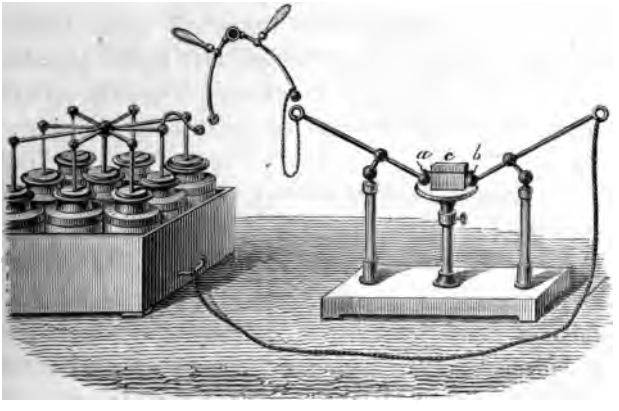

Fig. 33. — Batterie électrique.

intérieure sera électrisée positivement et l'autre négativement.

Nous pouvons ensuite supprimer les communications de la batterie avec la machine, et cette batterie restera chargée d'électricité pendant un temps assez long. Elle resterait indéfiniment chargée si l'isolement pouvait être parfait. Veut-on dépenser l'électricité actuellement conservée, il suffit de toucher l'armature extérieure avec un corps conducteur isolé, et d'approcher l'extrémité libre de ce

conducteur d'une des traverses métalliques de la batterie.

Dès que la distance est assez petite, une grosse étincelle, bruyante et éblouissante, éclate, et l'électricité disparaît. De la chaleur est créée dans toute l'étendue du conducteur, et s'il se trouve sur son trajet un fil de métal suffisamment fin *ab* (fig. 33), cette chaleur est rendue manifeste par l'incandescence de ce fil. Il peut même être fondu ou volatilisé ; c'est ainsi que le platine disparaît en vapeur, ce qui indique une température supérieure à 2000°.

Eh bien, la chaleur totale créée dans cette expérience est la même que celle que nous eussions obtenue en produisant la même quantité d'électricité et la dépensant au fur à mesure, comme nous le faisions dans l'expérience précédente. L'emploi de la batterie nous a seulement permis de créer cette chaleur en neutralisant d'un seul coup les électricités, au lieu de la créer par une succession de neutralisations partielles. La décharge rapide de la batterie ne met pas en jeu plus d'énergie qu'une suite de décharges, la quantité d'électricité étant la même.

VII. La machine de Holtz.

M. Holtz, de Berlin, a imaginé récemment une nouvelle machine électrique, dans laquelle on voit l'électricité servir à la conversion du travail en chaleur d'une manière excessivement remarquable.

Un disque de verre fixe présente deux ouvertures A, D sur un même diamètre. Chacune d'elles porte une bande de papier, collée sur l'un de ses bords et découpée en pointe dirigée vers le centre de l'ouverture (fig. 34). En face des deux bandes de papier

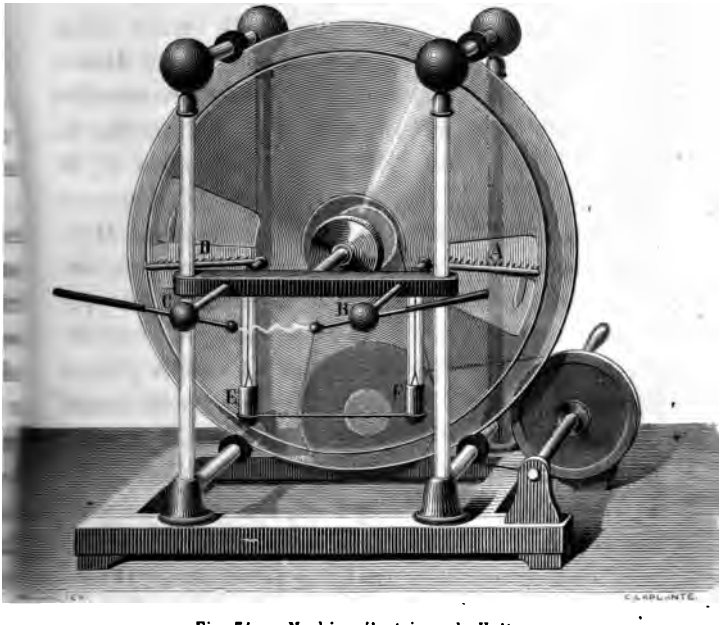

Fig .34. — Machine électrique de Holtz.

sont des peignes de métal, portés par des conducteurs isolés B, C. Les extrémités opposées de ces conducteurs peuvent être rapprochées ou éloignées l'une de l'autre à volonté. Enfin, entre le disque fixe et les peignes de métal, se trouve un disque de

verre, que l'on peut faire tourner rapidement autour de son centre.

Pour mettre la machine en activité, on touche l'une des bandes de papier, A, par exemple, avec une plaque de caoutchouc préalablement frottée avec une peau de chat, en maintenant en contact les extrémités des conducteurs C et B. On fait tourner le disque mobile en sens contraire de la direction donnée aux pointes de papier ; on sépare ensuite les conducteurs. On voit aussitôt des étincelles se succéder rapidement entre leurs extrémités C, B, quand elles sont peu écartées, et moins rapidement quand on augmente leur distance. Chaque étincelle indique un courant, allant dans les conducteurs, du peigne D voisin de la bande de papier qui n'a pas été touchée, à l'autre peigne A. On peut cesser de toucher la bande de papier A avec la plaque de caoutchouc, et la machine donne indéfiniment des étincelles, tant que dure la rotation du disque mobile. Lorsque ce disque est arrêté, les électricités se dissipent dans l'atmosphère, et la machine perd son activité. On empêche cette déperdition en faisant communiquer avec les conducteurs B, C les armatures d'une petite bouteille de Leyde E, F, et la machine peut conserver son activité pendant quelques instants, sans qu'on ait besoin d'électriser de nouveau l'une des bandes de papier.

La machine est donc capable de développer des quantités indéfinies d'électricité ; l'action mutuelle de ses diverses parties engendre à chaque instant

des quantités égales de chaque électricité, lesquelles se neutralisent, quand elles ont acquis une certaine tension ; puis de nouvelles quantités leur succèdent, qui se neutralisent à leur tour, et ainsi de suite indéfiniment ; il y a une suite continue d'apparitions et de disparitions de l'électricité. Chaque disparition est accompagnée d'une création de chaleur; il semble ainsi que l'on crée des quantités de chaleur indéfinies, qui se dissipent finalement par rayonnement et par conductibilité dans les corps environnants ; mais on remarque que le mouvement de rotation du disque de verre exige une certaine quantité de travail mécanique. Pour le démontrer, on ramène à l'état naturel toutes les parties de la machine ; il suffit pour cela de laisser la machine en repos pendant quelque temps. On met ensuite le disque en mouvement, sans toucher l'une des bandes de papier avec la plaque de caoutchouc, et on remarque alors que la résistance au mouvement est beaucoup plus faible que précédemment ; le surcroît de résistance qu'on sent à la main lorsque la machine donne de l'électricité, est la manifestation d'une dépense de travail, occasionnée par les effets de la machine, et on conçoit que ce travail soit finalement converti en chaleur. Mais un caractère singulier et inattendu de ce mode de conversion, celui qui donne à la machine de Holtz une importance particulière, c'est que la conversion du travail en chaleur s'accomplit ici par l'intermédiaire de l'électricité se renouvelant inces-

samment ; c'est que la machine est à la fois le générateur et le consommateur d'une énorme quantité d'électricité, après avoir reçu l'excitation préalable d'une très-faible quantité d'électricité, ou, comme on dit, après avoir été amorcée.

Les quantités d'électricité créées par la machine de Holtz peuvent être conservées temporairement, pour être dépensées ultérieurement au gré de l'expérimentateur. Pour cela, on fait communiquer les deux conducteurs C, B respectivement avec les armatures d'une batterie isolée, à l'aide de tiges de métal isolées. Puis on amorce la machine, les extrémités C, B étant en contact ; on les écarte ensuite à une grande distance l'une de l'autre, et la batterie se charge très-rapidement par la rotation du disque de verre. On peut ensuite la séparer de la machine, et s'en servir à la manière ordinaire, comme nous l'avons dit en traitant de la machine de Nairne.

En comparant ces deux machines, on voit que l'énergie se transforme et se conserve dans l'une et l'autre de la même manière, si l'on n'a égard qu'au premier et au dernier terme de cette transformation, c'est-à-dire au travail mécanique dépensé et à la chaleur créée par les décharges. La différence est dans les circonstances où l'électricité apparaît. Avec la machine de Nairne, le frottement développe les électricités, de sorte que l'électricité qui apparaît à un instant quelconque semble indépendante de la réaction des diverses parties de l'ap-

pareil. Au contraire avec la machine de Holtz il y a un mouvement dans lequel le frottement ne joue aucun rôle, et qui change périodiquement les positions relatives des parties de l'appareil; de là naissent des réactions qui font dépendre l'électricité apparue à chaque instant de celle qui l'a précédée. Pour que la machine de Holtz fût expliquée, comme l'a été la machine de Nairne, il faudrait rattacher les réactions aux principes fondamentaux de l'électricité, et c'est ce qui n'a pas encore, je crois, été fait d'une manière satisfaisante.

La bande de papier A a été électrisée négativement par le contact de la plaque de caoutchouc; dès lors elle est devenue source d'électricité, et le conducteur BC est électrisé par influence. La partie B prend l'électricité positive, et la partie C, l'électricité négative. La partie du plateau de verre mobile qui est voisine du peigne A est électrisée par ce dernier, avec étincelles entre sa surface et les pointes du peigne; par conséquent elle prend de l'électricité positive. Semblablement, le peigne D électrise négativement la partie du verre qui est voisine. Mais le plateau de verre tourne; la rotation amène rapidement la partie positive de ce plateau en face de la bande de papier D, qui est à l'état naturel, et la partie négative en face de la source A. De là naissent deux actions simultanées qui sont les causes de l'activité de l'appareil.

La première action s'exerce entre la pointe de la bande de papier D et la partie positive du plateau

qui l'avoisine. En vertu de cette action, de l'électricité négative apparaît à la pointe du papier et neutralise l'électricité positive du plateau. Le reste du papier conserve de l'électricité positive.

La deuxième action s'exerce entre la pointe de papier A et la partie négative du plateau qui l'avoisine. De l'électricité positive apparaît à la pointe de papier et neutralise l'électricité négative du plateau; de l'électricité négative reste sur la bande de papier et remplace celle qui a pu disparaître par le défaut d'isolement, pendant la rotation du plateau.

En continuant leur mouvement, les parties de ce plateau que nous considérons et qui viennent d'être ramenées à l'état naturel, passent de nouveau devant les pointes des peignes et s'électrisent comme précédemment; les mêmes phénomènes se perpétuent à chaque demi-tour.

On voit que ces phénomènes sont conformes aux principes généraux établis antérieurement, et l'on conçoit comment le papier A électrisé une fois pour toutes conserve une tension électrique constante, malgré le défaut d'isolement.

En résumé les changements de position que subissent les diverses parties de la machine occasionnent des phénomènes d'influence qui se succèdent régulièrement. A chaque demi-tour les conducteurs acquièrent des quantités déterminées d'électricité qui peuvent être dépensées immédiatement, ou emmagasinées dans la batterie; en même temps chaque portion du plateau acquiert de l'électricité, la

perd et prend ensuite une égale quantité d'électricité contraire. Mais quelle que soit la complication de cette suite d'opérations alternatives, la chaleur totale créée, soit dans la décharge des conducteurs C, B, soit dans les réactions du plateau mobile, équivaut au travail dépensé pour l'entretien du mouvement de rotation.

VIII. La pile de Volta. — Comment elle produit la chaleur, la lumière, les actions chimiques.

La pile de Volta réalise sous une forme remarquable la transformation de l'énergie par l'intermédiaire de l'électricité. Les nombreuses applications auxquelles elle a donné lieu font de sa découverte une des plus importantes de ce siècle. Déjà à son origine on prévoyait qu'un brillant avenir lui était réservé, et l'empereur Napoléon Ier attribuait un prix de 60,000 francs « à celui qui ferait faire à l'électricité et au galvanisme, par ses expériences et ses découvertes, un pas comparable à celui qu'avaient fait faire à ces sciences Franklin et Volta; mon but spécial étant d'encourager, écrit-il, et de fixer l'attention des physiciens sur cette partie de la physique, qui est, à mon sens, le chemin des grandes découvertes. » (Rapport de M. Dumas au Sénat. 1866.)

Ce prix fut décerné à l'illustre chimiste anglais Humphry Davy, et, ce qui est digne de remarque, à une époque où la France était en guerre avec l'Angleterre. Bel exemple de désintéressement, qui

fait le plus grand honneur aux savants français!

De nos jours un prix semblable fut créé par Napoléon III, et, avec un désintéressement non moins grand que celui de leurs devanciers, les savants qui composaient le jury ont décerné le prix à un Allemand, M. Ruhmkorff, mécanicien à Paris, connu dans le monde entier par ses appareils d'électricité. Nous verrons bientôt en quoi consiste la remarquable machine dont il a doté la science et l'industrie.

La pile de Volta est essentiellement formée d'une série de bocaux (fig. 35). Chacun d'eux contient de l'eau et de l'acide sulfurique, puis une lame de cuivre et une lame de zinc amalgamé qui ne se touchent pas. La lame de cuivre d'un bocal est réunie par un corps conducteur à la lame de zinc du bocal suivant. On attache au cuivre qui est libre à l'une des extrémités de la série un fil de cuivre, et au zinc qui est libre à l'autre extrémité un second fil de cuivre; ces deux fils s'appellent *rhéophores*, mot tiré du grec, et qui signifie *porte-courant*. Voici les phénomènes que présente cet appareil, lorsqu'il est parfaitement isolé.

De l'électricité positive apparaît dans la moitié de la série qui est terminée par la lame de cuivre; de là le nom de pôle positif que l'on donne à cette lame. De l'électricité négative apparaît dans l'autre moitié; de là le nom de pôle négatif, donné à la lame de zinc terminale. La tension de ces électricités est habituellement très-faible; il faut qu'il y ait plusieurs centaines de bocaux pour qu'elle de-

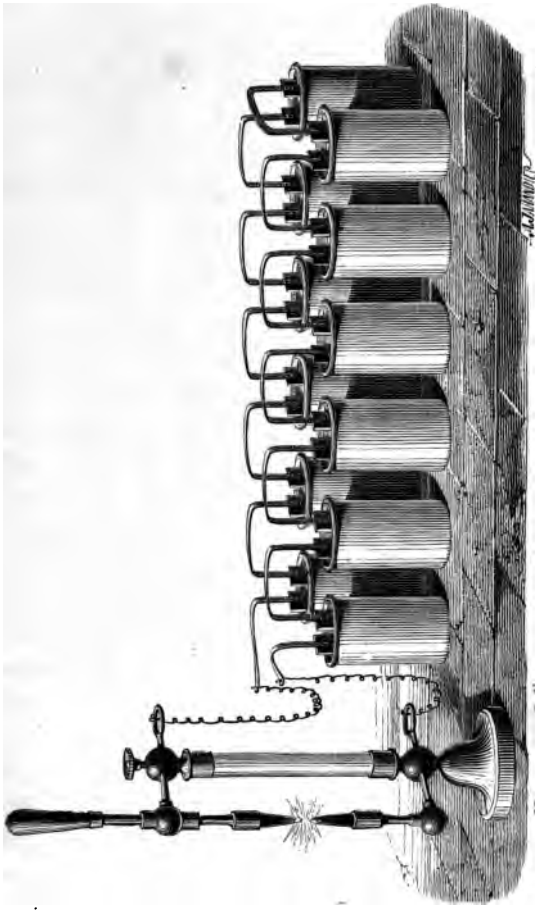

Fig. 55. — Pile voltaïque.

vienne comparable à celle de l'électricité que développe le frottement dans les machines ordinaires.

Si l'on approche très-près l'une de l'autre les extrémités libres des rhéophores, une étincelle jaillit entre elles, mais voici ce qui caractérise la pile, c'est que les étincelles se succèdent comme dans les expériences précédentes, lorsque nous dépensions du travail pour maintenir le mouvement du plateau de la machine de Holtz; la pile produit d'elle-même cette succession d'étincelles, qui peut durer plusieurs mois, comme l'a observé M. Gassiot en Angleterre, avec 3,000 bocaux. En même temps de la chaleur est entretenue dans tout l'appareil.

Quelle est la force motrice dont le travail est dépensé ainsi, et converti en chaleur ?

Le zinc se combine peu à peu avec l'oxygène de l'eau et avec l'acide sulfurique ; il s'y forme un sel qui reste dissous dans l'eau de la pile. Or cette combinaison chimique est un travail moléculaire dépensé ; nous savons déjà qu'elle est accompagnée dans les circonstances ordinaires d'un dégagement de chaleur qui équivaut à ce travail. La même transformation s'accomplit ici, mais dans des circonstances très-différentes.

Ordinairement 1 kilogramme de zinc, se dissolvant dans l'acide sulfurique étendu d'eau, dégage 560 calories. Le zinc de la pile est enduit d'une couche de mercure, qui l'empêche de se dissoudre dans les mêmes circonstances. Mais dès que les rhéophores sont réunis, et qu'ils constituent avec la pile

un circuit fermé, la dissolution du zinc s'effectue, et la chaleur dégagée se distribue dans tout le circuit, se partageant entre la pile et les rhéophores suivant des lois connues. Plus le fil est court, plus la chaleur créée se concentre dans la pile ; plus le fil est long, plus la part de chaleur qu'il prend est considérable. Mais la somme totale de chaleur qui apparaît dans tout le circuit est invariable, pour la même quantité de zinc dissous. A chaque kilogramme de zinc consommé, correspondent 560 calories créées. Supposons 1000 bocaux ; pour qu'il y ait 1 kilogramme de zinc dissous, il faudra que chaque bocal ait dissous 1 gramme de zinc ; car le même effet se passe dans tous les bocaux ; et les 560 calories auront fait leur apparition en se partageant entre les diverses parties du circuit. Cette loi remarquable a été définitivement prouvée par les expériences de M. Favre.

Ainsi le travail chimique dépensé dans la pile est converti en chaleur dans le circuit voltaïque ; mais quel est le rôle de l'électricité dans cette transformation? Sans pouvoir expliquer complétement ce rôle, nous pouvons montrer qu'il est analogue à celui que joue l'électricité dans toutes les autres machines électriques.

Le cas le plus simple est celui où la pile est constituée par un seul élément. L'expérience démontre que si cet élément est isolé, le cuivre acquiert de l'électricité positive, et le zinc une quantité égale d'électricité négative. Cette polarisation électrique

résulte évidemment de l'action mutuelle du zinc sur l'eau acidulée; car le cuivre ne s'altère pas quand le courant est établi, tandis que les deux autres parties de l'élément s'altèrent profondément; la polarisation persiste tant que l'action mutuelle peut s'exercer. Lorsqu'on réunit le zinc et le cuivre de l'élément par un fil conducteur, les électricités produisent le courant allant du cuivre au zinc, et le phénomène ressemble à celui que présente la décharge de la batterie électrique. A peine les électricités ont-elles disparu de l'élément, l'action mutuelle du zinc et de l'acide en font apparaître de nouvelles quantités qui produisent un nouveau courant, et ainsi de suite, de sorte que l'ensemble du circuit voltaïque présente la plus grande analogie avec une batterie électrique, qui serait successivement chargée et déchargée avec une excessive rapidité.

Les décharges qui se succèdent dans les rhéophores y déterminent la création de la chaleur; mais cette chaleur ne représente pas toute l'énergie développée par le jeu des forces moléculaires dans la pile; pour retrouver toute l'énergie de l'action chimique, il faut faire la somme de toutes les quantités de chaleur créées, soit dans la pile, soit dans les rhéophores.

Dès lors n'est-il pas naturel de penser que les électricités se neutralisent aussi bien dans la pile que dans les rhéophores? Et cela nous conduit à une conséquence très-importante, relative à l'origine de la chaleur chimique.

Lorsque les atomes des corps obéissent à leur attraction mutuelle et se combinent, le premier effet qui accompagnerait la destruction de leurs vitesses serait l'apparition des électricités. Leur neutralisation ultérieure serait suivie de l'apparition de la chaleur. Lorsque cette neutralisation s'opère au sein même du système de molécules en activité, on ne perçoit que les effets de la chaleur ; aussi peut-on dans la pratique faire abstraction de l'électricité intermédiaire. Lorsque la neutralisation s'opère en partie dans le système et en partie dans un autre système, on retrouve la chaleur à la fois dans ces deux parties. La transmission de l'énergie d'un système dans l'autre s'opère par l'intermédiaire de l'électricité et elle se manifeste à nos sens par un grand nombre de phénomènes.

On voit par là que l'électricité est une force universelle, qu'elle a pour fonction de distribuer l'énergie entre les parties des corps. Par elle s'accomplissent les transformations les plus merveilleuses, et l'étude du courant nous en donne les plus beaux exemples.

Tout le monde sait qu'on appelle lumière électrique, arc voltaïque, la succession d'étincelles éblouissantes qu'on fait jaillir entre deux pointes de charbon adaptées aux extrémités libres des rhéophores. Cette belle expérience, que nous devons à Humphry Davy, n'est autre que le transport des parcelles de charbon rendues incandescentes par la chaleur créée. Si l'on remplace les pointes de char-

bon par des pointes de métal, l'arc est formé par la vapeur de ce métal, et la coloration de la lumière suffit pour nous le prouver. Mais la démonstration est bien plus concluante lorsqu'on projette les rayons lumineux de l'arc sur un prisme, et qu'on forme un spectre, en plaçant convenablement une lentille au delà du prisme. On peut obtenir sur un écran blanc une image splendide présentant les cou-

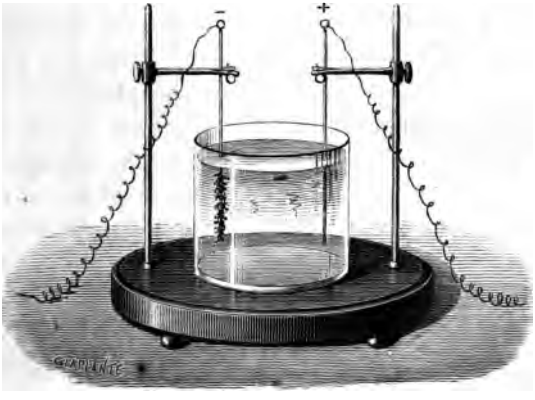

Fig. 36. — Décomposition d'un sel par un courant voltaïque.

leurs du spectre solaire, avec des raies brillantes, dont la couleur et la position varient avec la nature du métal. Ces raies nous montrent que certains rayons sont émis par chaque vapeur métallique en plus grande abondance que les autres ; aussi le physicien peut-il reconnaître la nature du métal à l'aspect du spectre obtenu dans cette expérience. Les premières observations précises ont été faites avec

l'étincelle de la batterie électrique par Masson en France, et elles ont conduit MM. Kirchhoff et Bunsen en Allemagne à une méthode pour découvrir la nature des corps. Son exactitude et sa sensibilité sont telles que déjà quatre métaux nouveaux ont été découverts.

Lorsque les extrémités libres des rhéophores sont plongées dans une solution saline (fig. 36), le rhéophore négatif se couvre de parcelles cristallines du métal contenu dans le sel, et les autres éléments se montrent sur l'autre rhéophore. Ainsi prenons des fils de platine pour rhéophores, et une solution d'azotate de plomb ; ce sel est formé d'acide azotique, d'oxygène et de plomb. Lorsque le courant agira sur lui, il déposera le plomb sur le rhéophore négatif, sous la forme de lamelles brillantes, et l'oxygène ainsi que l'acide azotique sur l'autre rhéophore. Tel est l'expérience capitale qui sert de base à la galvanoplastie. En voici l'explication.

Pour que la décomposition du sel s'effectue, il faut que les attractions mutuelles de ses atomes soient surmontées ; il y a donc un travail intérieur produit, et au travail qui apparaît doit correspondre une quantité équivalente d'énergie qui a disparu. Or le courant a pour rôle de transporter l'énergie créée dans la pile, et jusqu'à présent nous n'avons rencontré que des cas où cette énergie apparaissait comme chaleur. Ici nous avons une partie de cette énergie transformée en travail chimique ; par con-

séquent, la chaleur totale mise en liberté dans le circuit doit être moindre que précédemment, pour chaque kilogramme de zinc consommé, et la différence doit être proportionnelle au poids de sel décomposé. Il y a plus, si l'on recombinait le plomb,

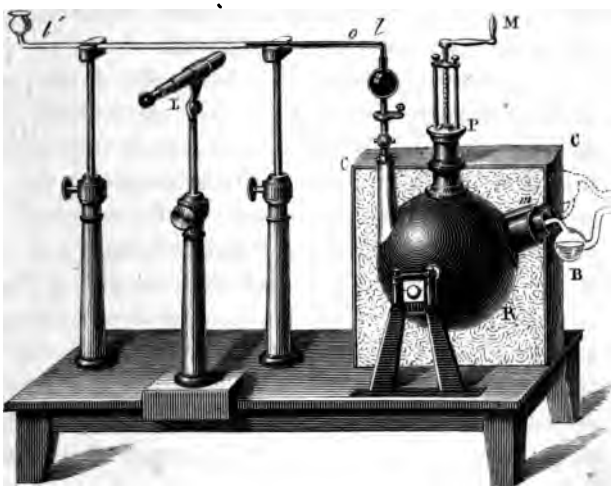

Fig. 37. — Calorimètre de Favre et Silbermann.

l'oxygène et l'acide azotique, on créerait une certaine quantité de chaleur ; cette chaleur doit être égale à celle qui a disparu dans le circuit, lors de la décomposition. On peut dire que la chaleur créée par la pile est en partie mise en liberté dans le circuit, en partie emmagasinée, tenue en réserve dans les produits de la décomposition. Nous retrouvons

là un exemple très-frappant de la conservation de l'énergie.

Toutes les conséquences que nous venons d'établir sont parfaitement conformes aux faits. Les expériences de M. Favre ne laissent aucun doute à cet égard. Vu leur importance, nous donnerons une idée de l'appareil imaginé par MM. Favre et Silbermann qui a servi à ces recherches.

Une grosse sphère de fonte, à laquelle est adapté un tube de verre divisé *ll'* (fig. 37), est remplie de mercure, dont le niveau se tient dans le tube; elle constitue une sorte de gros thermomètre. Cette grosse sphère porte une moufle de fer *m* dans laquelle on introduit le corps B qui doit dégager de la chaleur, et un cylindre P contenant un piston d'acier que l'on peut faire monter ou descendre pour amener avant chaque observation le niveau du mercure à un point marqué zéro sur le tube. L'appareil est entouré d'une caisse CC pleine de coton pour empêcher le rayonnement et la conductibilité de troubler l'échauffement du mercure.

Dans une série d'expériences préalables, on introduit dans la moufle des corps chauds qui, en se refroidissant dans l'appareil, lui cèdent des quantités de chaleur connues. On note sur le tube les positions correspondantes du niveau du mercure; puis on construit une échelle de divisions le long de ce tube, dont la simple lecture fait connaître le nombre de calories gagnées par l'appareil. Veut-on mesurer la chaleur dégagée dans la pile et dans les

rhéophores, on se sert de deux appareils ; dans la moufle de l'un on place la pile, et dans la moufle de l'autre les rhéophores. On n'a plus qu'à noter les divisions où s'arrêtent les niveaux du mercure dans chaque appareil, pour connaître les nombres de calories dégagées. Grâce à la simplicité et à la précision de ce calorimètre, les recherches les plus délicates ont pu être entreprises, et conduire à la découverte des relations les plus remarquables entre les actions diverses qui s'opèrent dans le circuit voltaïque, et dont nous ne pouvons donner q'uune idée dans cet ouvrage.

Les actions chimiques qui s'opèrent dans le circuit voltaïque sont soumises à une autre loi, découverte par le célèbre physicien anglais Faraday.

Lorsqu'on mesure le poids du plomb déposé sur le rhéophore négatif (fig. 36) et les poids de zinc dissous dans les divers éléments de la pile, on trouve que ceux-ci sont égaux entre eux et qu'ils sont en rapport constant avec le premier. Pour 103 grammes de plomb déposé, on a 33 grammes de zinc dissous dans chaque élément. Ces nombres sont justement ceux qui représentent dans quelles proportions le zinc et le plomb peuvent se substituer l'un à l'autre dans les combinaisons chimiques. Ainsi toutes les fois qu'on dissout du zinc et du plomb dans des poids égaux d'acide azotique, le poids du premier est au poids du second comme 33 est à 103. On donne à ces nombres le nom d'*équivalents chimiques*.

Semblablement, si l'on décompose l'eau par le courant, pour 1 gramme d'hydrogène porté sur le rhéophore négatif, on a 33 grammes de zinc dissous dans chaque élément de la pile.

La loi est générale : la quantité de substance déposée sur le rhéophore négatif est chimiquement équivalente au poids de zinc dissous dans chaque élément de la pile.

Parmi les curieux phénomènes que les lois précédentes expliquent, nous citerons le suivant, qui a longtemps embarrassé les physiciens.

Construisez un élément voltaïque, avec une lame de cuivre et une lame de zinc aussi grandes que vous le voudrez, plongées dans de l'acide sulfurique étendu, et réunissez les deux lames par un fil de métal ; vous pourrez rougir, volatiliser ce fil. Il semble donc que cet appareil soit capable de développer des quantités énormes d'électricité, et par conséquent d'énergie. Et pourtant si vous plongez les deux rhéophores dans de l'eau acidulée, vous ne pourrez décomposer l'eau. Au contraire, deux éléments de petites dimensions, disposés comme ceux de la figure 35, produisent un courant incapable de rougir le fil de métal, et décomposent l'eau avec la plus grande facilité.

Voici l'explication de ces effets. Pour que nous puissions décomposer l'eau par le courant, il faut que le poids du zinc dissous soit toujours 33 fois celui de l'hydrogène dégagé. Or 1 gramme d'hydrogène produit, en se combinant avec l'oxygène

pour constituer l'eau, 35 calories environ; et 33 grammes de zinc, en se dissolvant dans l'acide sulfurique étendu d'eau, produisent 18 calories. Pour dégager 1 gramme d'hydrogène par le courant, il faut donc dépenser 35 calories, et si la pile n'a qu'un seul élément, elle n'en peut produire que 18, nombre inférieur à 35. La décomposition est donc impossible. Mais si nous prenons une pile de deux éléments, nous aurons 36 calories créées, et l'eau trouvera la quantité d'énergie qu'elle doit dépenser. Lorsque 33 grammes de zinc auront été dissous dans chaque élément, il y aura 1 gramme d'hydrogène dégagé, dépensant 35 calories, et 1 calorie seulement aura été distribuée dans tout le circuit sous la forme de chaleur sensible.

IX. L'œuvre d'Ampère.

Outre la chaleur et le travail chimique, le courant voltaïque développe dans le circuit un autre genre d'actions qui ont été découvertes par l'illustre Ampère.

En 1820, Œrstedt, professeur à Copenhague, découvrit fortuitement qu'un rhéophore, traversé par un courant, dévie une aiguille aimantée qui est dans son voisinage. Ce genre d'actions, dont nous nous occuperons dans le chapitre suivant, fut étudié avec beaucoup de soin par Ampère, et cette recherche le conduisit à une découverte capitale.

Deux portions quelconques d'un même circuit,

ou de deux circuits différents, exercent l'une sur l'autre une action mutuelle, en vertu de laquelle elles entrent en mouvement, si elles sont convenablement disposées. Ampère imagina une foule d'appareils très-ingénieux, qui lui permirent de réaliser les mouvements les plus variés, attraction ou répulsion, déviation suivie d'équilibre, rotation continue, etc. Dans ces expériences les portions de circuit mobiles acquièrent de la vitesse par l'effet de leur action mutuelle; par conséquent elles

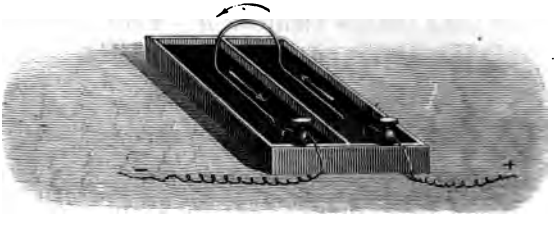

Fig. 58. — Répulsion de deux portions consécutives d'un courant voltaïque.

gagnent de la force vive, ou, ce qui est synonyme, du travail mécanique est produit.

Voici quelques exemples de ces phénomènes. Une auge en bois est séparée en deux compartiments par une cloison de même substance, et on y met du mercure (fig. 58); puis on fait flotter sur le mercure un fil de cuivre recourbé de telle façon que ses extrémités s'appuient respectivement sur le mercure de chacun des compartiments; ce fil de cuivre est un conducteur mobile, faisant commu-

niquer les deux masses de mercure. On y plonge ensuite les deux rhéophores d'une pile respectivement en face des extrémités du fil mobile. Immédiatement on voit ce fil fuir les rhéophores. Il y a donc une action mutuelle répulsive entre le flotteur et le mercure, lorsqu'ils sont traversés par un courant voltaïque. Cette observation est d'accord avec

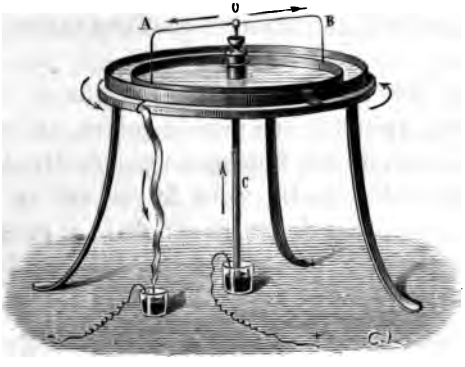

Fig. 39. — Rotation continue d'un courant par un courant.

un fait que nous avons déjà signalé, c'est que les parties contiguës d'un corps électrisé se repoussent mutuellement. On en tire habituellement cette conclusion, que deux parties consécutives d'un même courant se repoussent.

Si l'on voulait obtenir du travail à l'aide de ce genre d'action, il faudrait imiter la disposition suivante.

Un vase de cuivre annulaire contient de l'eau acidulée (fig. 39); une colonne de cuivre terminée

par un godet plein de mercure s'élève suivant l'axe du vase, et soutient un fil de cuivre, qui est posé sur le fond du godet par une pointe d'aiguille O. Ce fil présente une partie horizontale et rectiligne AB et deux parties verticales qui sont soudées à un ruban circulaire immergé dans l'eau de la cuve. Par cette disposition, le fil de cuivre mobile est très-délicatement suspendu par un seul point, et peut tourner d'une manière continue autour de ce point.

Pour faire passer un courant dans ce fil, on adapte un rhéophore au vase de cuivre, et l'autre à la colonne centrale. Supposons que ce dernier soit celui du pôle positif, alors le courant va de la colonne au godet de mercure ; de là il passe dans l'eau de la cuve par les fils OA, OB ; de l'eau le courant passe au vase de métal, et enfin au rhéophore négatif.

On place ensuite autour de l'appareil un cercle formé d'un fil de cuivre, recouvert de soie et enroulé plusieurs fois sur lui-même. Les extrémités de ce fil sont en contact avec les rhéophores, de sorte qu'un courant traverse toutes les spires. L'action mutuelle de ces spires et du fil mobile le fait tourner dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens du courant.

On conçoit la possibilité d'élever un poids à l'aide de cette rotation, et par suite d'obtenir un travail mécanique mesurable ; mais on n'a pas fait d'expérience de ce genre, à cause de la faible puis-

sance d'un pareil moteur. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'on a d'autres moteurs qui utilisent bien mieux la force électrique. Mais sans que nous ayons besoin d'élever un poids, nous voyons la rotation produire un travail, puisque la partie immergée du conducteur mobile surmonte la résistance de l'eau, et puisqu'il y a toujours un frottement au pivot.

Ainsi l'énergie créée dans la pile est maintenant distribuée comme il suit. Une première partie est convertie en chaleur sensible dans tout le circuit; une seconde est convertie en travail chimique, car l'eau de la cuve de cuivre est décomposée, et l'on y voit les bulles d'hydrogène se dégager sur le ruban circulaire, lorsque la colonne centrale reçoit le rhéophore négatif, ou bien sur le fond de la cuve, au-dessous du ruban, lorsque c'est la cuve qui reçoit le rhéophore négatif. Enfin, la troisième partie de l'énergie est convertie en travail mécanique extérieur. Si l'on arrête le mouvement de rotation, on cesse d'avoir ce travail; par suite l'énergie ne subit plus que les deux premières transformations. Aussi pour le même poids de zinc dissous dans la pile, et par conséquent pour le même poids d'eau décomposée dans la cuve, on devra trouver plus de chaleur dans tout le circuit, lorsqu'il y a repos que lorsqu'il y a rotation.

Le travail extérieur qu'on peut obtenir à l'aide des courants voltaïques seuls est excessivement petit, en comparaison de l'énergie créée dans la

pile. Pour pouvoir calculer un tel travail, il faut connaître la grandeur de l'action mutuelle de deux petites portions de circuit, puis décomposer par la pensée les circuits qui agissent l'un sur l'autre en petites portions semblables. Connaissant ensuite le déplacement de chacune d'elles, on calcule le travail élémentaire qu'elle effectue, d'après les règles de la mécanique ; enfin on fait la somme de tous

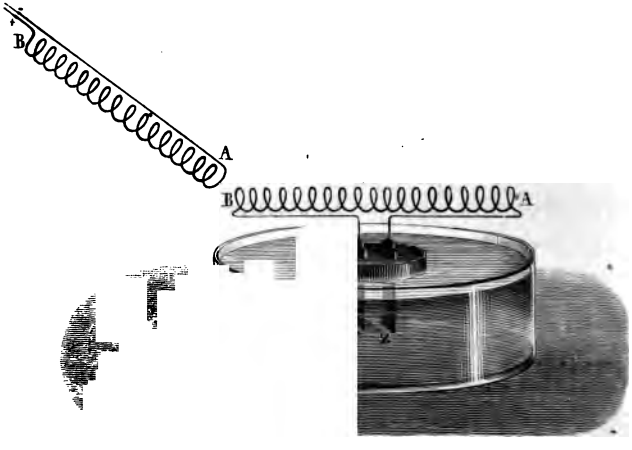

Fig. 40. — Solénoïdes.

ces travaux. On comprendra la faiblesse de cette somme par le résultat suivant.

Lorsque deux portions rectilignes de circuit ont une longueur de 1 mètre, sont placées parallèlement à une distance réciproque de 1 mètre, et conduisent chacune un courant capable de décomposer 9 milligrammes d'eau, elles exercent une action mu-

tuelle de 188 milligrammes. Cette action est attractive si les courants sont de même sens, répulsive s'ils sont de sens contraire. Pour produire un tel courant, il faudrait employer un grand nombre d'éléments de Bunsen ordinaires.

Nous citerons un dernier exemple de l'action mutuelle des circuits voltaïques, afin d'en tirer une importante conséquence dans le chapitre suivant.

Un fil de cuivre, recouvert de soie, est enroulé en spirale (fig. 40), et ses extrémités réunies ensemble sont adaptées aux deux rhéophores d'une pile. Ampère, qui a imaginé cette disposition, l'a appelée *solénoïde*. Cet appareil se comporte comme un assemblage de conducteurs circulaires, ayant leurs centres sur une même droite perpendiculaire à leurs plans, et conduisant des courants parallèles et d'égale intensité.

Prenons un second solénoïde et soudons ses extrémités, comme l'a fait M. Pinaud, respectivement à une lame de cuivre et à une lame de zinc, portées par une plaque de liége. Faisons flotter cet appareil sur de l'eau acidulée, et nous aurons réalisé un solénoïde mobile en activité. En effet, la pile est constituée par l'eau et les lames de cuivre et de zinc, et le courant va du cuivre au zinc en traversant toutes les spires du solénoïde.

Lorsqu'on regarde l'une des extrémités d'un solénoïde, le courant traverse chaque spire dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, ou dans un sens contraire. Appelons cette extrémité

pôle boréal dans le premier cas, et *pôle austral* dans le second. Nous aurons un moyen facile de désigner les extrémités d'un solénoïde.

Eh bien, quand on approche du solénoïde flotteur l'autre solénoïde tenu à la main, on observe que les pôles de même nom se repoussent, tandis que les pôles de noms contraires s'attirent.

Ampère a imaginé une admirable théorie, pour enchaîner entre eux tous les phénomènes de ce genre, qu'il a appelés *électro-dynamiques*. Ayant étudié attentivement et mesuré les circonstances qui accompagnent quelques-uns de ces phénomènes, il a appliqué le calcul mathématique aux lois expérimentales observées, et, sans faire aucune hypothèse sur la nature du courant électrique, il a découvert une formule unique qui exprime comment varie l'action mutuelle de deux portions rectilignes infiniment petites de circuit, lorsqu'on change l'intensité des courants, la longueur de ces portions, leur distance, les angles qu'elles font, soit entre elles, soit avec la droite qui joint leurs milieux.

Quand on considère deux portions quelconques de circuit, on les regarde comme des assemblages de portions rectilignes infiniment petites, et leur action mutuelle s'obtient par les règles ordinaires de la mécanique rationnelle. L'enchaînement donné par Ampère est un bel exemple d'une théorie mathématique des phénomènes physiques qui dépendent d'une même cause, et il est important de

remarquer qu'il est inutile pour l'établir de connaître cette cause, ou de faire quelque hypothèse sur sa nature. Nous verrons bientôt que cette théorie embrasse une autre classe de phénomènes qui jusqu'alors avaient été attribués à une cause différente de l'électricité. L'œuvre d'Ampère ainsi généralisée est le plus beau modèle qu'on puisse recommander à ceux qui veulent s'adonner à l'étude de la physique, et qu'une imagination ardente pousse aux recherches scientifiques.

X. Les courants induits de Faraday.

Aux découvertes de Volta et d'Ampère, vint s'ajouter celle de l'*induction*, faite en 1832 par un célèbre physicien anglais, qui vient de terminer une vie glorieuse, entièrement consacrée à la science et à la vertu. Récemment une éloquente parole exposait l'œuvre de Faraday[1], et il ne sera pas inutile de retracer ici quelques traits de cette grande figure, l'une des gloires de l'Angleterre.

« Le nom de Faraday doit être ajouté à la liste de ceux qui ont été aussi sincères dans leur foi que profonds dans leur science. Les hommes religieux de l'Angleterre constatent que Newton et Faraday, qu'ils considèrent, l'un comme le plus élevé des géomètres, l'autre comme le plus heureux des expérimentateurs, n'ont rien vu dans l'étude de la

[1] Éloge de Faraday, prononcé par M. Dumas à l'Académie des sciences, le 18 mai 1868.

nature qui pût ébranler leur croyance. Newton, pénétrant dans les profondeurs des cieux, assujettissant pour toujours la marche des astres au calcul, et révélant à l'homme les lois du système du monde; Faraday, pénétrant dans les entrailles de la matière, faisant jaillir du choc de ses particules invisibles ou de la rencontre des forces insensibles qu'elles recèlent des pouvoirs merveilleux ou re-

Fig. 41. — Induction faradaïque.

doutables, ont également gardé, disent-ils, les pieuses convictions de leur enfance. L'orgueil du succès ne les a jamais enivrés, et tandis que leurs propres découvertes servaient, à côté d'eux, d'arguments aux incrédules, leur conviction personnelle ne s'est pas démentie un instant. » Ce grand penseur avait sur les principes des choses des opinions bien différentes de celles que l'on prête quel-

quefois aux physiciens modernes, à ceux qui consacrent leurs veilles à l'étude du monde matériel. « Faraday ne croyait même pas à l'existence de la matière, loin de lui tout accorder; il ne voyait dans l'univers qu'une seule force obéissant à une seule volonté. Ce qu'on appelle matière n'était à ses yeux qu'un assemblage de centres de force. »

Voici en quoi consiste essentiellement la découverte de Faraday.

Prenez deux bobines de fil de cuivre recouvert de soie (fig. 41); adaptez aux extrémités de l'un des fils les rhéophores d'une pile, et réunissez les extrémités de l'autre fil par un conducteur quelconque tel qu'un galvanomètre. Il se développe un courant dans ce dernier, lorsqu'on rapproche ou qu'on éloigne les bobines l'une de l'autre. Dans le premier cas, le courant produit est de sens contraire à celui du courant voltaïque; dans le second cas, il est de même sens. On l'appelle *courant induit;* sa durée est à peu près celle du déplacement des bobines.

On peut interpréter cette expérience de la manière suivante. Considérez deux fils conducteurs, dont l'un AB soit traversé par un courant; d'après le sens du courant, nous savons qu'il y a de l'électricité positive en A, négative en B, et que ces électricités se neutralisent dans le conducteur. Quand on approche un second fil CD du premier, les électricités apparaissent à ses extrémités, puis elles se neutralisent dans le fil, en produisant un

courant de sens contraire; il indique que l'extrémité C, voisine de A, a pris temporairement de l'électricité négative, et que l'autre D a pris en même temps de l'électricité positive. Il y a donc analogie entre l'induction et l'électrisation par influence. Dans ces deux sortes de phénomènes, il y a polarisation d'un corps primitivement à l'état naturel par une source d'électricité. L'analogie peut être rendue plus frappante par l'expérience suivante.

Prenez pour A et B deux sphères isolées, et donnez-leur des quantités égales d'électricités contraires. Puis placez près d'elles deux autres sphères isolées C, D, qui soient réunies par un fil et conducteur. Elles prendront par influence la polarité. Approchez les respectivement de A et B. Les quantités d'électricité qu'elles contiennent augmenteront et, pendant cette augmentation, un courant temporaire ira de C en D. Éloignez-les; les électricités se neutraliseront partiellement par l'intermédiaire du fil conducteur, et vous aurez un courant allant de D vers C.

La différence essentielle que présentent ces diverses manières de produire un courant par influence, consiste dans l'inégale tension de l'électricité libre. Elle est excessivement faible et souvent inappréciable, quand les systèmes AB, CD forment deux circuits fermés. Mais une étude attentive des faits déjà connus conduit à ne point séparer, quant à la cause, les phénomènes élec-

triques en deux classes distinctes, à savoir : les phénomènes de tension, et ceux de courant. Cette séparation n'existe point dans la nature, et dans tout phénomène électrique il faut considérer à la fois ces deux genres d'effets, lesquels se succèdent ou s'accomplissent simultanément dans des proportions variables suivant la disposition des appareils.

Puisque le courant induit est occasionné par le déplacement d'un circuit à l'état naturel par rapport à un circuit traversé par un courant permanent, il est aisé de prévoir qu'il est possible de produire un courant induit continu, par un déplacement continu. Une loi remarquable, découverte en Allemagne par M. Lenz, en 1834, indique dans quelles circonstances on réalise ce genre d'induction.

Prenez deux circuits distincts qui agissent l'un sur l'autre, conformément à la loi d'Ampère, lorsqu'ils sont traversés par des courants ; puis, laissant l'un d'eux dans l'état où il se trouve pour l'expérience électro-dynamique, supprimez la pile de l'autre, et mettez à sa place un simple conducteur. Dès que vous déplacez à la main l'un de ces circuits, vous produisez un courant induit dont le sens est contraire à celui du courant voltaïque, qui serait capable de produire le même déplacement dans l'expérience électro-dynamique.

Exemple : Le solénoïde à main de la figure 40 étant animé par la pile, il y a attraction entre les pôles A et B : notez le sens du courant qui parcourt

ce solénoïde. Puis remplacez la pile par un galvanomètre, et approchez à la main les extrémités A et B ; vous observerez dans le fil du solénoïde un courant de sens contraire au précédent. Ce courant sera de très-courte durée, parce que le rapprochement ne peut lui-même durer qu'un instant.

Mais prenez l'appareil à rotation continue de la figure 39. Remplacez la pile qui animait le conducteur circulaire fixe par un galvanomètre, et faites tourner à la main le fil mobile AB, qui conduit le courant de la pile comme dans notre expérience électro-dynamique ; vous observerez un courant induit dans le conducteur circulaire ; ce courant durera tant que vous entretiendrez la rotation. Voilà un nouveau moyen d'engendrer l'électricité par le travail mécanique.

XI. Du rôle de l'électricité en général.

Il est à remarquer que dans ces expériences le courant induit a une origine mécanique, comme celui de la machine de Holtz ou de la machine de Nairne, que l'énergie est simplement transformée par l'intermédiaire de l'électricité. Habituellement le moteur qui développe le travail mécanique nécessaire est notre bras, et la quantité d'énergie que dépensent nos muscles se retrouve dans le circuit sous forme de chaleur ; puis elle passe aux corps voisins par rayonnement ou par conductibilité. Lorsque nous employons le courant pour décompo-

ser un corps, nous emmagasinons une portion de cette énergie dans les atomes du corps, et cette portion peut rester longtemps en réserve ; elle reparaît sous forme de chaleur, quand les mêmes atomes se combinent de nouveau entre eux, et ces transformations continuent indéfiniment avec des intermittences. Cette énergie peut être tenue en réserve dans les atomes d'une substance alimentaire, et si, par hasard, nous en faisions usage, nous rentrerions en possession de cette énergie. Mais entre l'opération qui nous a enlevé cette énergie et celle qui nous la restituerait, il pourrait y avoir une série de transformations intermédiaires. Il est évident que l'énergie partie d'un corps revient très-rarement à sa source ; ce sont des quantités égales d'énergie, venues d'ailleurs, qui lui succèdent, et qui maintiennent l'équilibre. Ainsi notre muscle qui vient de fournir une certaine quantité d'énergie dans nos expériences, réparera ultérieurement ses pertes par notre alimentation. Mais l'énergie qu'il a perdue se retrouve quelque part dans l'univers ; elle a passé par notre muscle, venant d'une source inconnue ; elle sera conservée ; telle est la loi dictée par le Créateur.

En résumé la force électrique sert à la transformation de l'énergie ; elle permet à cette transformation de s'opérer immédiatement, par les courants ; elle la tient en réserve par la polarité. Les corps qui retiennent l'énergie temporairement sous l'influence de la force électrique exercent entre eux

des actions mutuelles attractives ou répulsives. Quand ils perdent ensuite l'énergie emmagasinée en eux, ils perdent aussi leurs propriétés attractives ou répulsives.

Une quantité donnée d'électricité est capable de deux rôles différents, suivant qu'elle est en réserve, ou en action. Ainsi, pour décomposer 9 grammes d'eau, il faut dépenser certaines quantités égales des deux électricités. Les mêmes quantités, étant tenues en réserve dans deux conducteurs isolés, déterminent entre eux une attraction qui dépend de leurs distances. En comparant les résultats de diverses expériences, MM. Weber et Kolhrausch ont trouvé que si ces corps sont deux sphères, dont la distance soit de 1 kilomètre, leur attraction mutuelle équivaut à la pression d'un poids supérieur à 2 billions de kilogrammes. Ces nombres font bien ressortir la différence essentielle de la pile et des machines électriques à frottement. La pile met en jeu d'énormes quantités d'électricité, à condition que l'électricité soit dépensée à mesure qu'elle apparaît; mais cette électricité ne peut acquérir une forte tension ; deux conducteurs mis en communication avec les pôles d'une pile isolée, ne reçoivent que très-peu d'électricité. Au contraire une machine de Nairne ou toute autre analogue donne beaucoup d'électricité à un corps conducteur, mais il faut un temps assez long pour que cela ait lieu.

Dans l'économie de la nature, l'électricité agit *plutôt* par les courants, et par suite elle sert d'in-

termédiaire à des transformations dont nous ne voyons guère que le commencement et la fin. A de rares intervalles seulement les effets de tension ap-

Fig. 42. — Paratonnerre.

paraissent, c'est le tonnerre et les éclairs, mettant en jeu d'énormes quantités d'électricité qui étaient tenues en réserve dans les nuages, et qui se neu-

tralisent tout à coup avec d'immenses étincelles. Tous les phénomènes que nous étudions dans nos laboratoires se reproduisent d'une façon grandiose et souvent terrible. Mais le génie de l'homme peut par de sages inventions dompter ces forces gigantesques, et détourner les malheurs qui le menacent. Une tige de métal (fig. 42), qui communique avec les profondeurs de la terre, et qui s'élève au-dessus d'une habitation, suffit pour la préserver de la foudre. Par l'influence du nuage électrisé, la région qui porte cette tige est électrisée à son tour, et la tension de l'électricité contraire à celle du nuage devient énorme au sommet de la pointe. De continuelles décharges électriques s'opèrent entre cette pointe et le nuage, sous forme d'aigrettes faiblement lumineuses, et le nuage est peu à peu ramené à l'état naturel. Non-seulement le paratonnerre préserve le voisinage, mais encore il enlève au nuage l'énergie qui le rendait dangereux. On peut dire que le paratonnerre éteint les orages. Hommage à l'illustre physicien de Philadelphie qui a doté l'humanité de cette admirable invention!

CHAPITRE VII

LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

I. La polarité magnétique.

On connaissait au temps de Thalès, 600 ans avant notre ère, une pierre noire ou brune qui attirait le fer. On la trouvait sur une montagne de Lydie, voisine de la ville de Magnésie ; de là vient le nom de magnétisme que nous donnons aujourd'hui à la cause des propriétés de cette pierre. Platon l'appelait pierre d'Héraclée ; Sophocle, pierre de Lydie, parce qu'on la trouvait aussi dans les localités de ce nom. Au moyen âge on la désigne encore sous le nom de pierre de l'Inde ; aujourd'hui on l'appelle communément pierre d'aimant. C'est à Gilbert, médecin anglais qui vivait à la fin du seizième siècle, que nous devons les premières notions précises sur les phénomènes du magnétisme. Deux siècles plus tard Coulomb établit une théorie de ces phénomènes

qui est encore en usage dans l'enseignement, bien qu'elle ne satisfasse plus aux conditions d'une bonne théorie; car non-seulement elle repose sur une hypothèse relative à la nature du magnétisme, mais en outre elle ne peut plus enchaîner entre eux tous les faits connus aujourd'hui, et les immortelles découvertes d'Ampère, Arago, Faraday, etc., ont rendu

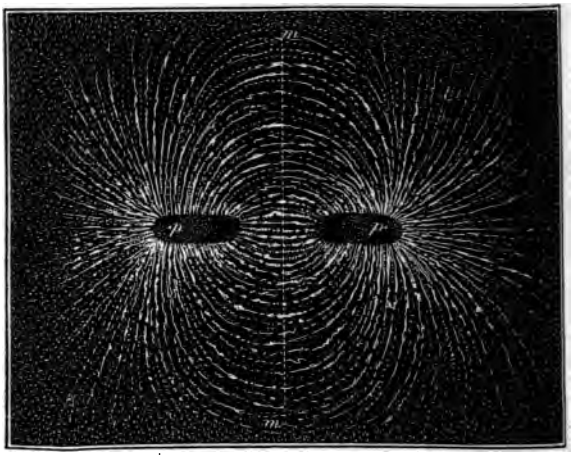

Fig. 43. — Fantôme magnétique.

tout à fait inadmissible le fluide magnétique d'Œpinus et de Coulomb. La méthode expérimentale veut que les phénomènes soient étudiés et comparés entre eux, sans qu'on se préoccupe de leur cause intime.

Un corps est un aimant lorsqu'il attire la limaille de fer et qu'il présente au moins deux centres

d'attraction, doués de propriétés antagonistes.

Plongez un aimant ordinaire dans la limaille de fer, vous le retirerez couvert de houppes formées par les grains de limaille. Si vous placez l'aimant sous une feuille de carton, et si vous saupoudrez cette feuille avec la limaille, vous obtiendrez un dessin, qu'on appelle *fantôme magnétique* (fig. 43). Ce dessin est très-régulier, lorsqu'on a soin de donner de petites secousses au carton, pour laisser aux

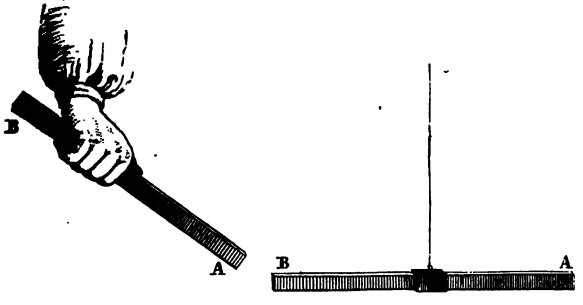

Fig. 44. — Action mutuelle de deux aimants.

grains de fer la liberté de céder à l'action magnétique. Ces grains se rassemblent en lignes, dont la loi géométrique est facile à déterminer; elles partent de deux points situés vers les extrémités de l'aimant, qu'on appelle *pôles magnétiques*. Cette expérience fait connaître la loi d'attraction et prouve que l'action de l'aimant sur le fer s'exerce à travers le carton. On obtiendrait le même effet en remplaçant le carton par toute autre substance, à l'exception du fer.

Suspendez maintenant par un fil l'aimant débarassé de la limaille (fig. 44), et vous le verrez prendre une direction déterminée, qui est à peu près celle de la ligne sud-nord. On appelle *pôle nord*, le pôle tourné vers le nord, et *pôle sud*, l'autre.

Un second aimant ayant été l'objet d'une étude semblable, il est très-facile de reconnaître, en présentant à l'aimant suspendu les pôles du second aimant tenu à la main, la loi suivante :

Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms différents s'attirent. Ainsi se trouve prouvé l'antagonisme des deux pôles d'un même aimant.

Un aimant peut avoir un nombre de centres d'attraction supérieur à deux. On reconnaît comme précédemment que les centres sont alternativement de noms différents. Si le premier attire le pôle nord de l'aimant suspendu, le second le repousse, le troisième l'attire, etc. On appelle ordinairement ces centres des *points conséquents*.

Nous pouvons aisément rattacher au principe de la polarité magnétique l'action de l'aimant sur la limaille de fer. Prenons en effet un cylindre de fer et plaçons-le près d'un aimant ; il deviendra lui-même un aimant à deux pôles, et le pôle voisin de l'aimant sera de nom contraire à celui de l'aimant. Mais le fer ainsi placé est un aimant temporaire ; il perd son activité à mesure qu'on l'éloigne de l'aimant fixe, et reprend l'état naturel lorsqu'il est suffisamment éloigné. Dans l'expérience du fantôme magnétique, chaque grain de limaillle est un petit

imant temporaire, et les grains consécutifs s'attirent par leurs pôles contraires.

Ainsi le fer s'aimante par l'influence d'un aimant, le même qu'un conducteur isolé s'électrise par l'influence d'une source électrique ; mais la différence le ces deux phénomènes est très-grande. Le conlucteur amené au contact de la source électrique agne définitivement de l'électricité, qu'il conserve près la séparation ; tandis que le fer aimanté temorairement ne peut conserver de magnétisme

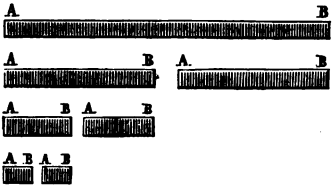

Fig. 45. — Expérience de l'aimant brisé.

près son contact avec l'aimant. Il rentre toujours l'état naturel quand on l'éloigne.

Si on présente à l'aimant un cylindre d'acier, il e comporte d'abord comme le cylindre de fer ; il cquiert la polarité magnétique, mais lentement, andis que le fer l'acquérait très-rapidement. D'aure part, lorsqu'on éloigne de l'aimant l'acier aimanté par influence, il conserve sa polarité, il ne entre pas à l'état naturel. On dit habituellement u'il y a dans l'acier une *force coercitive* qui est la ause de cette différence entre l'acier et le fer. Mais e mot n'explique rien, et sert uniquement à rap-

peler cette différence d'effet. Les aimants dits artificiels sont des morceaux d'acier, aimantés d'une manière analogue.

La constitution d'un aimant nous est révélée par une curieuse expérience de Gilbert. On prend une aiguille d'acier aimantée, et ayant deux pôles (fig. 45), on la casse en plusieurs fragments, et l'on constate que les moitiés voisines de deux fragments consécutifs ont des pôles contraires. En rapprochant ces fragments, et reconstituant l'aiguille aimantée primitive, on voit disparaître ces pôles ; ils se neutralisent donc mutuellement.

On conclut de cette observation qu'un aimant est un assemblage de petits aimants élémentaires, orientés par files parallèles, et dans lesquels les pôles de même nom sont tournés du même côté.

La polarité de l'aimant est une conséquence mathématique de la polarité de chaque élément, comme on le prouve par le raisonnement, sans qu'il soit nécessaire de faire aucune hypothèse.

II. Identité du magnétisme et de l'électricité.

Il était réservé à Ampère de découvrir la véritable analogie qui existe entre le magnétisme et l'électricité, et de rattacher à une même cause des phénomènes qui jusqu'à lui avaient été attribués à des causes distinctes. Les faits qui suivent conduisent en effet à admettre que les aimants et les corps électrisés sont sous l'empire d'une seule force, la

force électrique, et que la diversité des phénomènes résulte de la diversité de structure des corps.

Lorsque Œrstedt eut découvert la déviation d'une aiguille aimantée sous l'influence d'un conducteur traversé par un courant, Ampère, Biot, Savart, Faraday, démontrèrent que ce phénomène était un

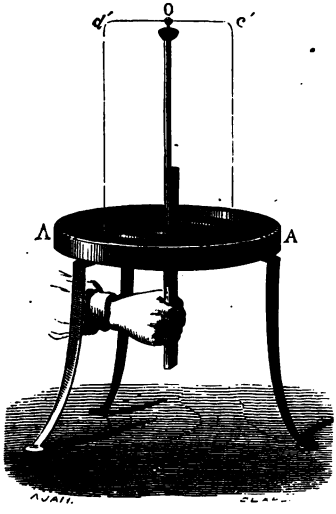

Fig. 46. — Rotation d'un courant par un aimant.

cas particulier d'une action plus générale, laquelle s'exerce toujours entre un circuit voltaïque et un aimant, quelles que soient leurs positions relatives. En employant des supports convenables, on réalisa les mouvements les plus variés, soit de l'aimant, soit d'une portion de circuit voltaïque. Parmi les expériences nombreuses qui furent faites à cette

époque, nous citerons les suivantes, parce qu'elles rentrent plus particulièrement dans notre sujet.

Servons-nous d'un appareil semblable à celui qui a été décrit dans le chapitre précédent (fig. 46); supprimons le conducteur circulaire fixe et plaçons un aimant vertical dans l'axe de rotation du conducteur mobile. Si la colonne centrale est en communication avec le rhéophore positif de la pile, et

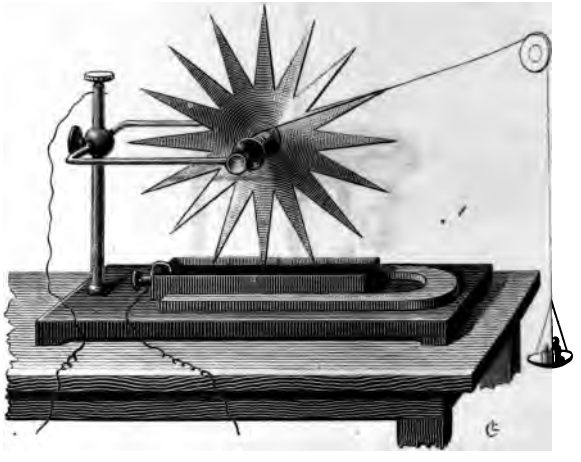

Fig. 47. — Roue de Barlow.

si l'aimant est au-dessous de la cuve annulaire, avec son pôle sud en haut, nous verrons l'équipage tourner dans le sens de la rotation des aiguilles d'une montre. Nous obtenons donc du travail mécanique par l'action mutuelle de l'aimant et d'un circuit voltaïque. Il semble que l'aimant se comporte

ici comme le conducteur circulaire fixe de notre expérience précédente. La rotation est plus rapide avec l'aimant qu'avec le conducteur circulaire, et on peut, en employant un aimant puissant, obtenir un travail mécanique directement mesurable.

La disposition suivante, due au physicien anglais Barlow, rend cette détermination très-facile.

Une roue de cuivre, découpée comme on le voit sur la figure 47, afin qu'elle soit aussi légère que possible, est portée par un axe horizontal. Sa partie inférieure plonge dans une petite auge contenant du mercure, et cette auge est placée entre les deux branches d'un aimant en fer à cheval. On fait communiquer les coussinets qui portent l'axe de la roue avec l'un des rhéophores d'une pile, et le mercure de l'auge avec l'autre rhéophore. On voit aussitôt la roue tourner très-rapidemement, dans un sens qui dépend du sens du courant et de la position des pôles de l'aimant. Si l'axe de la roue porte une poulie, on peut élever un poids à l'aide de ce mouvement de rotation et par suite obtenir un travail mesurable en kilogrammètres. On pourrait par ce moyen vérifier la loi de la distribution de l'énergie dans le circuit voltaïque, telle qu'elle a été formulée dans le chapitre précédent. On trouverait que le travail produit est proportionnel à une certaine quantité de chaleur disparue dans le circuit.

Déjà l'analogie d'un aimant avec un courant électrique est manifeste; mais nous en avons un exemple encore plus frappant.

Présentons au solénoïde flotteur (fig. 40) un aimant, nous trouverons que les pôles de même nom se repoussent, tandis que les pôles différents s'attirent, exactement comme si le solénoïde était un aimant.

En général, à toute expérience faite à l'aide d'un aimant et d'un courant électrique correspond une expérience faite à l'aide de deux courants ; il suffit de substituer un solénoïde à l'aimant. Bien plus, l'action mutuelle d'un courant et d'un aimant peut se calculer à l'aide d'une formule, qui exprime l'action d'un élément de courant sur un pôle magnétique. Cette formule a été déduite d'observations faites sur un aimant, sans qu'on ait introduit dans le calcul aucune hypothèse sur la cause du magnétisme. Elle conduit au même résultat que si l'on imagine l'aimant remplacé par un solénoïde et si l'on calcule l'action mutuelle du solénoïde et du courant à l'aide de la formule d'électro-dynamique donnée par Ampère. L'action mutuelle d'un courant et d'un aimant suit donc la même loi que celle d'un courant et d'un solénoïde, et l'identité des effets conduit naturellement à admettre l'identité des causes.

Nous savons qu'un aimant est un assemblage d'éléments doués de la polarité magnétique. Nous pouvons maintenant assigner à cette polarité son origine électrique; il suffit de considérer les éléments magnétiques comme de petits solénoïdes, orientés de façon que leurs pôles de même nom se trouvent

urnés du même côté, et par conséquent de conceir des courants électriques circulant autour des oupes moléculaires qui composent l'aimant.
Dans le fer, ces courants s'établissent très-facinent, sous l'influence d'un aimant; mais ils disraissent ou se neutralisent dès que cette inence est supprimée. Dans l'acier et la pierre ıimant, au contraire, ces courants persistent rès leur création.
Cette conception est évidemment une hypothèse; us ne la donnons pas comme un fait d'expéence. Elle rend très-manifeste l'origine électrique s propriétés des aimants. Mais on doit remarquer e la conception des éléments magnétiques est lépendante de cette hypothèse, et que l'idée d'atbuer leur polarité à la force électrique est une nséquence rationnelle des lois numériques qui t été observées. En d'autres termes, il est inutile ntroduire dans la théorie des phénomènes maétiques une force particulière: la force élecque suffit. Il est vrai que nous ignorons comment te force produit les effets que nous observons; nment elle établit la polarité électrique et la poité magnétique; mais nous ne savons pas davanre comment la force calorique et la force pesanteur ssent dans les corps, et notre but est d'éta- r les relations des phénomènes naturels, abstrac- n faite de leur cause intime. A ce point de vue ıs devons accepter l'admirable théorie d'Ampère, ıs chercher à nous figurer ce qui se passe dans

les éléments magnétiques, ce que sont les courants électriques.

Les découvertes qui ont suivi celle d'Ampère ont pleinement confirmé sa théorie ; c'est à partir de cette époque que la science de l'électricité a reçu les perfectionnements les plus remarquables, et qu'elle a commencé à se vulgariser avec une étonnante rapidité, grâce aux applications merveilleuses auxquelles elle a conduit. Il suffit de rappeler la télégraphie et les machines électro-magnétiques pour faire ressortir l'importance du mouvement scientifique qui a suivi l'œuvre d'Ampère. Au milieu des nombreux usages que l'homme a su faire de la force électrique, des mille transformations de l'énergie qu'il a pu obtenir et varier à son gré, par l'intermédiaire du magnétisme et de l'électricité, il serait difficile, si l'on n'avait pas la théorie d'Ampère, de tracer une voie aisée qui permît de les embrasser d'un coup d'œil. Grâce à cette théorie, une telle entreprise n'est pas impossible, et nous pouvons la tenter, sans aborder les détails.

III. Aimantation du fer par un courant électrique.

Si l'on dispose un fil de cuivre horizontalement au-dessus du solénoïde flotteur (fig. 40), ce dernier tourne sur lui-même et se place dans une direction perpendiculaire à celle du fil, aussitôt que celui-ci est traversé par un courant électrique. Ce phéno-

mène rentre dans la classe de ceux dont Ampère a donné la théorie.

En généralisant, nous dirons que le fil conducteur du courant tend toujours à amener un solénoïde dans une direction perpendiculaire à la sienne.

Plaçons maintenant une tige de fer perpendiculairement à notre fil, et assimilons cette tige à un assemblage de solénoïdes infiniment petits, orientés de toutes les manières possibles. Chacun d'eux va tendre à se placer perpendiculairement au fil, et par conséquent parallèlement à la longueur de la tige. Il résultera de l'action mutuelle du courant et des solénoïdes ou éléments magnétiques une orientation de ces derniers ; tous les pôles de même nom se tourneront du même côté, et la tige de fer deviendra un aimant à deux pôles. On peut même prévoir de quel côté sera le pôle nord de cet aimant, en suivant les règles de l'électro-dynamique.

Si on enroule plusieurs fois le fil conducteur du courant autour de la tige de fer, chaque spire agira de la même manière, mais avec une plus grande intensité que le fil rectiligne, de sorte que l'aimantation du fer sera plus puissante (fig. 48).

Enfin, dès qu'on supprimera le courant dans le fil conducteur, les éléments magnétiques cesseront d'être orientés, et l'aimantation cessera.

Telles sont les prévisions de la théorie. Ces phénomènes ont été observés pour la première fois par Arago et par Ampère, en 1820, immédiatement

après l'expérience d'Œrstedt. Une pièce de fer entourée d'un fil de cuivre recouvert de soie, afin que les spires soient isolées, s'appelle *un électro-aimant.* Elle devient un aimant temporaire sous l'influence d'un courant qui traverse le fil. On voit sur la figure 49 un électro-aimant attirant une grande quantité de pointes de fer.

En augmentant l'intensité du courant, on augmente la puissance magnétique de la pièce de fer,

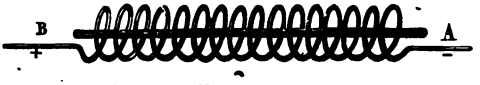

Fig. 48. — Hélice magnétisante.

mais jusqu'à une certaine limite, qui dépend de la dimension du fer. M. Ruhmkorff construit un électro-aimant dans lequel le fer a la forme d'un fer à cheval, et pèse 350 kilogrammes ; le fil de cuivre qui est enroulé autour du noyau de fer a une longueur de 2 kilomètres 1/2, et un diamètre de 4 millimètres environ. On peut lui faire porter un poids de 10,000 kilogrammes suspendu à une pièce de fer qu'on appelle *armature*, et qui est attirée par l'électro-aimant quand le courant passe.

Lorsqu'un circuit voltaïque est établi entre deux endroits quelconques, qui peuvent être très-éloignés l'un de l'autre, et qu'un électro-aimant se trouve dans le circuit à l'une des stations, on peut, en se plaçant à l'autre station, ouvrir ou fermer le circuit, et par suite rendre à volonté magnétique le fer de l'électro-aimant. Dès lors son armature peut être

attirée au gré de l'opérateur, et faire mouvoir par un mécanisme convenable les signaux d'un appareil. Tel est le principe du télégraphe électrique. Il a été appliqué avec succès sous cette forme

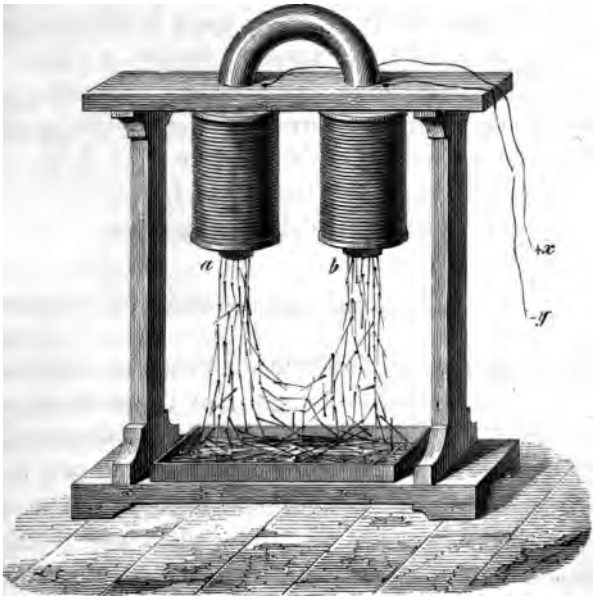

Fig. 49. — Électro-aimant.

par M. Wheatstone, en Angleterre, vers 1840.

Mais déjà antérieurement à M. Wheatstone, M. Stenheil en Allemagne, M. Morse en Amérique, avaient employé le courant électrique de diverses manières.

Les premiers essais à l'aide de l'électricité ont

été faits en 1774 par Lesage, de Genève. Avant la découverte de la pile voltaïque, on se servit de la machine électrique ordinaire et des électroscopes. Après la découverte de la pile, Sœmmering, de Munich, essaya vers 1811 le courant et la décomposition de l'eau. Puis, après la découverte d'Œrstedt en 1820, Ampère songea à l'appliquer à la télégraphie; mais on ne commença à obtenir de résultats satisfaisants, au moins pour les grandes distances, qu'à partir de 1837. L'introduction des électro-aimants a levé toutes les difficultés qui s'étaient jusqu'alors présentées.

IV. Les machines électro-magnétiques.

Il est très-facile d'obtenir du travail mécanique à l'aide du courant voltaïque, par l'intermédiaire des électro-aimants. Supposons que l'armature de fer d'un électro-aimant soit liée à un axe par un organe de transmission, et qu'en oscillant elle fasse tourner cet axe; pour la faire osciller par l'électricité, il faut la disposer devant les pôles de l'électro-aimant, et faire passer le courant lorsqu'elle se trouve éloignée; elle est alors attirée. Au moment où l'armature va être le plus près possible de l'électro-aimant, il faut supprimer le courant; la vitesse acquise ramène l'armature à sa première position. En continuant à faire passer et à supprimer alternativement le courant aux instants convenables, on obtiendra l'oscillation de l'armature

et par suite la rotation de l'axe. Cet axe porte une roue massive, appelée volant, pour régulariser le mouvement, et on transmet le mouvement aux outils à l'aide de courroies, comme avec une machine à vapeur : l'armature joue simplement le rôle du piston moteur.

Une pièce indispensable dans une telle machine, qu'on appelle *électro-magnétique*, est l'interrupteur, destiné à fermer et ouvrir alternativement le circuit voltaïque, afin que le courant soit lancé dans l'électro-aimant et arrêté aux instants convenables.

C'est en 1839, à Saint-Pétersbourg, que les premières tentatives furent couronnées d'un véritable succès. Une machine électro-magnétique, inventée par M. Jacobi, fut établie sur un bateau à aubes, et lui fit remonter la Néva avec douze personnes. Depuis cette époque on a imaginé un nombre considérable de machines de ce genre, et les dispositions les plus ingénieuses ont été mises en usage. Bien qu'il n'entre pas dans notre sujet de traiter les applications de l'électricité, nous ne pouvons passer sous silence les résultats pratiques auxquels on est arrivé. Il est très-intéressant de voir si les espérances que beaucoup de personnes fondent sur l'emploi des moteurs électro-magnétiques sont légitimes.

Nous savons déjà comment le travail est obtenu avec une machine à vapeur. La combustion du charbon dans le foyer met en liberté une quantité déterminée d'énergie sous forme de chaleur. Une

portion de cette énergie est convertie en travail par l'intermédiaire de la vapeur; le reste est simplement transporté aux corps environnants par rayonnement et conductibilité. Comme résultat pratique, on obtient 270,000 kilogrammètres en une heure, en dépensant 2 kilogrammes environ de charbon; c'est le travail d'un cheval-vapeur. Le prix de ce travail est environ de 10 centimes.

Considérons maintenant une machine électro-magnétique. La dissolution du zinc dans la pile est une combinaison chimique, analogue à une combustion; elle met en liberté une quantité déterminée d'énergie sous forme de chaleur. Une portion de cette énergie est convertie en travail par l'intermédiaire du courant; le reste est distribué dans tout le circuit voltaïque sous forme de chaleur, et se dissipe ensuite dans les corps environnants. La meilleure machine sera celle dans laquelle la proportion d'énergie transformée en travail sera la plus grande, et par conséquent celle qui consommera la moindre quantité de zinc pour produire une quantité donnée de travail. Or, d'après les expériences que M. E. Becquerel a faites sur les machines de l'Exposition universelle de 1855, la meilleure machine électro-magnétique doit consommer $2^k,2$ de zinc pour produire 270,000 kilogrammètres par heure. Le prix de ce travail est de 1 fr. 50 environ, c'est-à-dire 15 fois plus grand que celui du même travail obtenu avec la machine à vapeur. Cette considération ferait

rejeter immédiatement les machines électro-magnétiques au point de vue industriel.

Mais il faut remarquer que ces machines sont plutôt destinées à de petits travaux intermittents, qu'alors leur puissance est bien inférieure à celle d'un cheval-vapeur. Une machine à vapeur de même puissance pourrait dans ces conditions être beaucoup moins avantageuse. Elle exige une surveillance continuelle; elle ne se prête pas aux intermittences du travail; elle peut faire explosion; enfin le travail qu'elle produit coûte seulement 5 fois moins que celui de la machine électro-magnétique : celle-ci est donc dans certains cas préférable.

Il est intéressant de comparer sous un autre point de vue les deux sortes de moteurs. Quelle est dans l'un et l'autre la proportion d'énergie convertie en travail?

2 kilogrammes de charbon dégagent en brûlant 15,000 calories; 270,000 kilogrammètres représentent la même quantité d'énergie que 635 calories. Cette quantité n'est que $\frac{1}{25}$ de la première. C'est ce qu'on appelle le *coefficient économique* réel de la machine à vapeur.

$2^k,2$ de zinc dégagent dans leur combinaison chimique avec l'oxygène de l'eau et l'acide sulfurique 12,276 calories. Sur cette quantité d'énergie, 635 calories sont transformées en travail par la machine électro-magnétique, c'est $\frac{1}{20}$ de l'énergie totale.

L'énergie n'est donc pas beaucoup mieux utilisée dans les machines électro-magnétiques que dans les machines à vapeur. Dans les unes et les autres, la plus grande partie de l'énergie dépensée est dissipée sous forme de chaleur.

V. Les courants magnéto-électriques.

La théorie d'Ampère est encore conforme aux phénomènes d'induction par les aimants que Faraday a découverts. Considérez un aimant et un conducteur placé dans son voisinage. Si ce dernier est traversé par un courant, il y a une action mutuelle, qui tend à changer les positions relatives de l'aimant et du conducteur. Ainsi la roue de Barlow nous a montré un conducteur mis en mouvement par l'action d'un aimant ; supprimez la pile qui produisait le courant et remplacez-la par un galvanomètre ; puis opérez à la main la rotation de la roue dans le même sens que précédemment ; vous observerez au galvanomètre un courant continu de sens contraire à celui que produisait la pile.

En général, à toute expérience relative à l'action mutuelle d'un aimant et d'un circuit voltaïque correspond une expérience d'induction, et le courant induit dure autant de temps que le mouvement imprimé à l'un ou l'autre. Telle est l'extension de la loi de Lenz, dont nous avons déjà parlé dans le chapitre précédent.

Les phénomènes d'induction sont beaucoup plus faciles à produire avec une grande intensité par les aimants que par les courants voltaïques seuls. Aussi trouvons-nous une nouvelle application des électro-aimants ; c'est la génération de la lumière électrique à l'aide du travail mécanique.

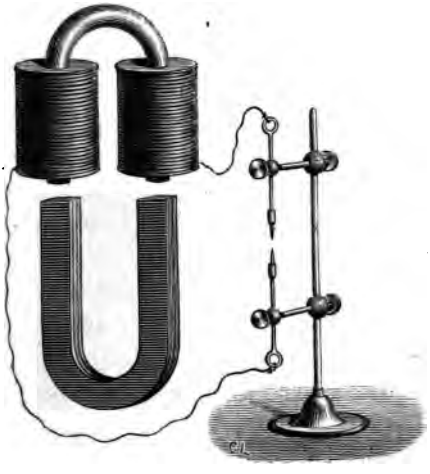

Fig. 50. — Principe des machines magnéto-dynamiques.

Prenons un électro-aimant en fer à cheval (fig. 50), et adaptons aux extrémités du fil conducteur qui l'enveloppe deux baguettes de charbon, terminées en pointes. Approchons rapidement les faces polaires de cet électro-aimant des pôles d'un puissant aimant fixe ; un courant électrique va parcourir le circuit formé par le fil et les charbons, rougir leurs

pointes et donner entre elles un point lumineux. Éloignons l'électro-aimant, un courant de sens contraire au précédent sera engendré et donnera encore un point lumineux entre les pointes de charbon. Renouvelons rapidement le rapprochement et l'éloignement; nous engendrerons une suite de courants alternativement de sens contraires, une suite de points lumineux qui se succéderont sans intermittence apparente; nous aurons la lumière électrique, mais nous dépenserons en même temps du travail mécanique pour entretenir le mouvement de l'électro-aimant, et il y a évidemment une relation déterminée entre l'intensité de notre lumière et la grandeur du travail dépensé.

En réalité, le mouvement détermine dans le noyau de fer de l'électro-aimant des alternatives d'aimantation et de désaimantation. Ces modifications de l'aimant déterminent à leur tour les courants induits dans le fil conducteur. Enfin ces courants donnent lieu à de la chaleur qui se distribue dans toutes les parties du circuit, et dont une portion seulement apparaît aux pointes de charbon sous forme de lumière. C'est ainsi que le travail dépensé se trouve finalement converti en chaleur, et qu'ici, comme dans tous les exemples déjà cités, la force électrique sert à transformer l'énergie.

Il est maintenant facile de comprendre une machine magnéto-dynamique, telle que celle de Nol-

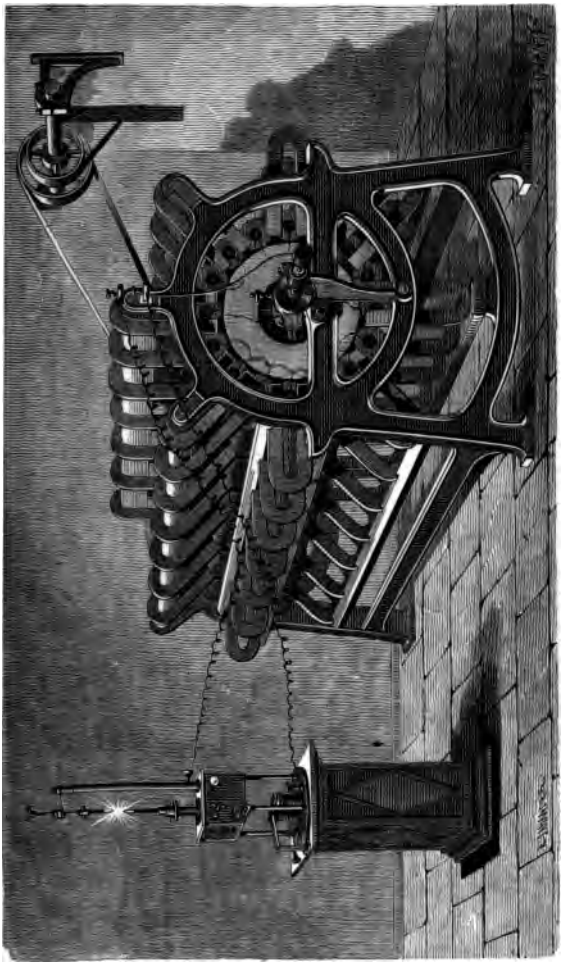

Fig. 51. — Machine de Nollet.

t, aujourd'hui construite par une compagnie *Alliance*), pour les phares.

Plusieurs aimants puissants sont ajustés, à des tervalles égaux, sur une couronne circulaire fixe g. 51); le plan moyen de chacun d'eux est dirigé ıivant un rayon, et les pôles sont tournés vers le ıntre. Des électro-aimants en nombre égal sont ustés semblablement sur une seconde couronne rculaire, concentrique, et mobile autour du ıntre. Les pôles de ces électro-aimants sont tourés vers la couronne fixe, et viennent passer devant ıs pôles des aimants, lorsqu'on fait tourner la ɔuronne mobile. Le fil de chaque électro-aimant st mis en communication avec les rhéophores qui boutissent aux charbons à l'aide d'un pièce partiulière portée par l'axe de rotation, de sorte que ɜs courants induits vont tous passer par les charıons. Enfin la couronne mobile est mise en mouement par une machine à vapeur.

Considérons un des électro-aimants en mouvenent. Quand il s'approche d'un des aimants fixes, ın courant est excité dans son fil; lorsqu'il s'en ıloigne, un second courant de sens contraire succède au premier. Mais l'électro-aimant se rapproche bientôt de l'aimant fixe qui suit; alors est ɜxcité un troisième courant de même sens que le ɔremier et ainsi de suite.

Tous les électro-aimants se comportent simultaıément de la même manière; on peut donc réunir ous leurs fils en un fil unique enroulé successive-

ment autour de tous les noyaux de fer, et dont les extrémités aboutissent à l'axe métallique de rotation et à une virole de métal fixée sur cet axe par l'intermédiaire d'une virole isolante. Deux ressorts s'appuient respectivement sur l'axe et sur la virole et communiquent avec les rhéophores.

On conçoit que les aimants fixes de la machine de Nollet puissent eux-mêmes être remplacés par des électro-aimants; alors il faudra une pile pour engendrer un courant capable de maintenir aimantés ces électro-aimants. On aura toujours une transformation de travail en chaleur par l'intermédiaire du magnétisme et de l'électricité ; mais l'emploi de la pile présentera une seconde transformation, celle de l'énergie moléculaire en chaleur opérée dans tout le circuit de cette pile. Or cette transformation est inutile, lorsqu'on a besoin seulement de conserver le magnétisme : il est bien plus naturel de transformer les noyaux de fer en acier et de les aimanter une fois pour toutes, puisqu'on sait que l'acier conserve de lui-même le magnétisme. L'emploi des électro-aimants dans cette machine est donc vicieux.

Voici un procédé très-ingénieux qui permet d'employer les électro-aimants; l'idée en est due à M. Wheatstone, et il a été réalisé récemment par M. Ladd à Londres. Un modèle de cette nouvelle machine donnant abondamment la lumière électr fonctionnait à l'Exposition universelle de 18 Aujourd'hui M. Ruhmkorff construit à Paris des

Fig. 52. — Machine de Ladd.

machines de ce système destinées à l'enseignement.

Les extrémités polaires d'un électro-aimant en fer à cheval A (fig. 52) sont façonnées de manière qu'elles laissent entre elles un espace cylindrique B. Dans cet espace se trouve une pièce que l'on voit séparée dans la figure 53. Elle se compose de deux électro-aimants de M. Siemens qui sont juxtaposés bout à bout, dans deux positions perpendiculaires. Chacun d'eux est formé par un noyau de fer dont les surfaces polaires sont sur un cylindre de même diamètre que l'espace cylindrique B, et sur lequel le

Fig. 53. — Bobine de Siemens.

fil conducteur isolé est enroulé parallèlement à l'axe. Lorsque ce double électro-aimant est placé dans l'espace cylindrique B, on peut le faire tourner autour de son axe à l'aide d'un moteur quelconque, par exemple avec la main, en se servant d'une manivelle et d'une courroie de transmission. Pendant la rotation les surfaces polaires des électro-aimants mobiles s'approchent et s'éloignent alternativement des pôles de l'électro-aimant fixe A, de sorte que les courants induits peuvent se développer, si ce dernier est aimanté.

Or voici le trait caractéristique de cette invention. Supposons que le noyau de fer A soit faiblement ai-

manté, et que le fil de l'un des électro-aimants mobiles D soit mis en communication avec le fil de l'électro-aimant fixe A, à l'aide d'une pièce particulière située au bout de l'axe de rotation, qu'on appelle commutateur. Dès qu'on fera tourner la machine, de faibles courants induits seront engendrés dans le fil de l'électro-aimant D et lancés dans une direction constante à travers le fil de l'électro-aimant A. Le fer de celui-ci acquerra donc une plus grande puisssance magnétique. Mais il agira plus énergiquement sur l'électro-aimant D, et par conséquent les courants qui y sont induits augmentant d'intensité, ils accroîtront de nouveau le magnétisme de l'électro-aimant A, et ainsi de suite.

Les deux électro-aimants A et D se renforcent ainsi mutuellement et atteignent au bout d'un temps très-court une puissance qu'ils conservent tant que le mouvement de rotation est entretenu, et qui augmente avec la rapidité de ce mouvement, au moins jusqu'à une certaine limite.

Maintenant que nous savons comment le travail dépensé est employé à produire l'aimantation, il est aisé de comprendre comment le second électro-aimant mobile C sert à produire le courant et la lumière électrique. Il suffit que les extrémités de son fil aboutissent à une pièce analogue à celle de la machine de Nollet, qui les fasse communiquer avec les rhéophores, et les phénomènes déjà décrits se reproduisent avec une intensité remarquable.

En disposant dans le circuit de l'électro-aimant C

un voltamètre, on décompose très-aisément l'eau; en interposant un fil de platine de $\frac{1}{3}$ de millimètre de diamètre, et de 30 centimètres de longueur, on le voit rougir dès que la machine est en mouvement.

Le fer de l'électro-aimant A n'étant pas tout à fait pur conserve toujours un peu de magnétisme, de sorte qu'on n'a pas besoin de lui en donner, pour amorcer en quelque sorte la machine, quand on veut s'en servir. La figure 52 représente un circuit formé par la bobine qui tourne dans la cavité B, un fil fin de platine E, et deux baguettes de charbon très-minces F qui sont maintenues appliquées l'une contre l'autre par un ressort. Quand on fait tourner les bobines mobiles, le fil est rougi et les baguettes de charbon donnent une lumière éblouissante.

La machine de Ladd offre une analogie frappante avec la machine de Holtz. Une première et très-faible excitation magnétique dans l'une, électrique dans l'autre, ayant été donnée à l'une des pièces de l'appareil, une quantité indéfinie de travail mécanique peut être ensuite convertie en énergie de forme quelconque, par l'intermédiaire de courants électriques.

Les opérations qui s'effectuent dans les diverses parties de ces appareils ont donc un caractère commun. Ce sont de simples actes, qui par eux-mêmes sont incapables de produire ou de dépenser de l'énergie ; mais qui accompagnent les transformations d'énergie dont nous observons les résultats.

Les mots *polarité électrique*, *polarité magnétique*

désignent de tels actes, et quoique nous ne puissions, dans l'état actuel de la science, nous représenter exactement le déplacement moléculaire qui leur correspond, leur emploi dans cette acception

Fig. 54. — Appareil de Foucault.

bien définie est de la plus grande utilité pour l'explication des phénomènes.

Les phénomènes de l'induction se produisent toujours dans un corps conducteur, lorsqu'il se meut dans le voisinage d'un circuit voltaïque ou d'un ai-

mant. Ils sont plus ou moins accessibles à l'observation immédiate, suivant la forme du corps ; mais ils se manifestent par la chaleur que les courants induits développent dans le corps, et qui peut être très-appréciable.

Nous devons à Foucault, dont la science déplore la perte prématurée, une belle expérience, dans laquelle on réalise la conversion du travail en chaleur, par l'intermédiaire du magnétisme et de l'induction.

On donne aux pôles d'un électro-aimant une forme telle qu'on puisse faire tourner entre eux un disque de cuivre (fig. 54). Le disque étant mis en mouvement à l'aide d'un système de roues dentées, le travail qui a été dépensé pour produire le mouvement est représenté par la force vive du disque. Dès qu'on fait passer un courant voltaïque dans le fil de l'électro-aimant, le noyau de fer acquiert du magnétisme, des courants sont induits dans le disque mobile, et ils engendrent de la chaleur. En même temps l'action mutuelle des pôles de l'aimant et du disque détruit sa vitesse, et on le voit s'arrêter brusquement. La chaleur créée par l'arrêt du disque équivaut à la force vive qu'il perd, et, par conséquent, au travail primitivement dépensé.

Si l'on agit sur la manivelle pour continuer le mouvement de rotation, on éprouve une résistance, comme si le disque était plongé dans un liquide visqueux ; mais la chaleur apparaît d'une manière continue, et elle élève graduellement la tempéra-

ture du disque ; on peut lui faire atteindre aisém la température de fusion de la cire. L'énergie veloppée par le bras de l'opérateur est compl ment transformée en chaleur.

Aucun de ces effets ne se produit si l'élect aimant est à l'état naturel.

VI. La machine de Ruhmkorff.

Une des plus curieuses transformations que l ait réalisées dans ces dernières années à l'aide l'induction est la production de l'électricité au que par le courant voltaïque. Nous avons vu co ment une machine électrique ordinaire peut à magasiner l'énergie dans une batterie, et comm cette énergie reparaît ensuite lorsque les élect cités des armatures de la batterie se neutralisen travers un corps conducteur, en y donnant lieu courant. Il était naturel de penser que l'électric d'une pile pouvait aussi jouer le même rôle, ch ger une batterie, et produire ensuite tous les eff de tension qui sont propres à l'électricité de fret ment. C'est Masson qui, vers 1842, a obtenu premiers résultats, indiquant la voie qu'il fall suivre pour résoudre le problème. M. Ruhmkor constructeur à Paris, se mit à l'œuvre, et ses co rageux efforts furent couronnés d'un légitime su cès. Aujourd'hui la machine de Ruhmkorff est u des merveilles de l'électricité ; elle charge une ba *terie* puissante en quelques secondes ; elle don

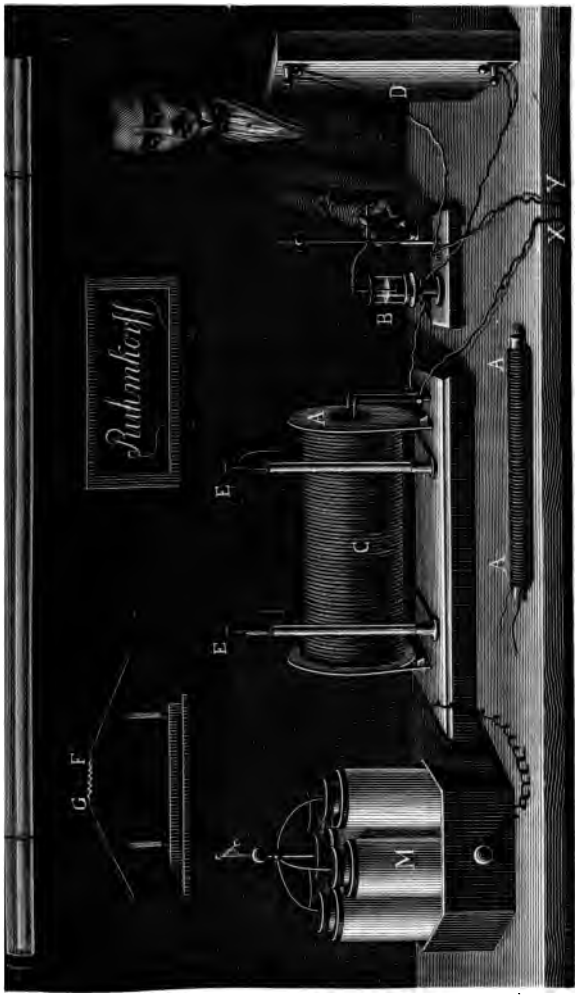

Fig. 55. — Bobine de Ruhmkorff.

des étincelles de 50 centimètres de longueur dans l'air ordinaire, de 6 mètres dans l'air raréfié; elle enflamme les mines à des distances considérables, elle sert à l'éclairage des mines de houille, etc. Son importance est telle qu'elle a valu à son inventeur le prix de 50,000 francs donné par l'empereur pour la meilleure application de la pile.

Nous indiquerons les principes sur lesquels repose cette remarquable machine, dont les lois ne sont d'ailleurs qu'imparfaitement connues, et qui est appelée à concourir efficacement au progrès de la science.

Un fil de cuivre isolé est enroulé en spirale autour d'un faisceau de fil de fer A (fig. 55). On le voit séparé de l'appareil, au bas de la figure. L'une des extrémités X de ce fil aboutit à l'un des pôles d'une pile, et l'autre à une couche de mercure recouverte d'alcool, B; le second rhéophore de la pile Y communique avec une pointe de platine, placée au-dessus du mercure. Un autre fil de cuivre isolé, d'un diamètre inférieur à $\frac{1}{10}$ de millimètre, et d'une longueur de plusieurs kilomètres, est enroulé autour d'un cylindre de verre, et forme une grosse bobine C, qui entoure le faisceau de fer A; les extrémités de ce long fil communiquent avec deux conducteurs, isolés par des pieds de verre. Nous appelons ce fil le fil induit. Enfin les armatures d'un condensateur électrique D, analogue à la batterie, communiquent par des fils de métal respectivement avec le mercure et la pointe de platine

de l'interrupteur B. Ce condensateur est ordinairement renfermé dans la boîte sur laquelle est placée la bobine.

Les travaux de plusieurs physiciens ont amené l'introduction de ces diverses pièces dans l'appareil. Ainsi l'on doit à Foucault l'interrupteur à mercure et alcool, à M. Fizeau le condensateur électrique, à M. Poggendorff une disposition particulière du fil induit, qu'il est superflu de décrire ici. M. Ruhmkorff, ajoutant ses propres observations à celles de ces savants, a su triompher d'une foule de difficultés et réaliser les indications de la théorie avec un succès inespéré. Son habileté et sa modestie lui ont conquis les sympathies universelles, et ce n'est pas sans admiration que l'on songe à l'humble ouvrier de Hanovre, qui débutait en 1840 par la construction d'un remarquable appareil de Melloni, et dont le nom est devenu aujourd'hui européen. C'est en 1838 que M. Ruhmkorff commença à se faire remarquer. Auditeur assidu au cours de physique de la Sorbonne, il eut un jour l'occasion de montrer à M. Pouillet un appareil de Clarke qu'il avait construit dans ses loisirs. Le professeur lui en demanda un semblable. Deux ans après, M. Ruhmkorff construisit pour le Conservatoire un appareil de Melloni. Le savant italien fut émerveillé de la perfection de cet appareil, et dès lors la réputation du jeune artiste fut assurée.

Examinons le jeu de l'appareil.

Les phénomènes de tension qu'on utilise sont

ceux qui s'accomplissent lorsque le circuit formé par la pile et le faisceau A est brusquement ouvert. Ce sont les seuls dont nous nous occuperons ici. Supposons donc la pointe de platine en contact avec le mercure B. Le courant de la pile traverse le fil qui entoure le fer A, et aimante celui-ci. Tant que les choses sont dans cet état, le fil induit C ne présente aucune modification. Vient-on à séparer la pointe de platine du mercure, une étincelle jaillit dans l'alcool à l'interruption, et immédiatement les armatures du condensateur D acquièrent les électricités contraires. En même temps, le faisceau de fer A tend à perdre son magnétisme. Les électricités du condensateur se neutralisent par le circuit que forment la pile et le fil du faisceau A, et produisent un courant de très-courte durée qui traverse le circuit dans un sens opposé à celui du courant primitif qu'engendrait la pile. L'effet de ce courant instantané est de ramener brusquement le fer A à l'état naturel, tandis que sans ce courant il y reviendrait dans un temps beaucoup plus considérable.

La disparition du magnétisme dans le fer équivaut à la suppression instantanée d'un aimant voisin d'un conducteur. Ce conducteur est ici le fil induit C ; il se trouve donc polarisé par influence. L'une des moitiés acquiert de l'électricité positive, l'autre moitié acquiert une quantité égale d'électricité négative. Si les conducteurs isolés EE auxquels aboutissent les extrémités du fil induit sont

en contact, les électricités se neutralisent immédiatement ; si ces conducteurs sont séparés par une distance convenable, les électricités qui s'y trouvent détachent les particules de leurs surfaces et il se forme un jet de parcelles métalliques allant de l'un à l'autre ; les électricités se neutralisent encore par cette voie et l'étincelle jaillit. Enfin, si la distance des conducteurs EE est trop grande, la neutralisation s'opère dans le fil C, et il n'y a pas d'étincelle.

Pour charger une batterie M, on met l'une de ses armatures en communication avec l'une des extrémités E du fil induit, et on approche l'autre extrémité F à une certaine distance d'un conducteur G qui communique avec la seconde armature de la batterie (fig. 55). On réitère alors plusieurs fois l'étincelle dans l'intervalle, en faisant osciller la pointe de platine au-dessus du mercure B, afin que le circuit voltaïque soit alternativement fermé et ouvert. Après quelques étincelles la batterie est chargée, et on peut la séparer de la machine pour s'en servir comme d'ordinaire.

Nous ne chercherons pas dans ce livre à suivre pas à pas les opérations intermédiaires qui déterminent ici la transformation de l'énergie. Nous devrions sortir du cadre que nous nous sommes tracé. Qu'il nous suffise d'énoncer cette importante conclusion : la machine de Ruhmkorff permet de conserver, d'emmagasiner, sous forme d'électricité statique, une certaine quantité d'énergie empruntée au travail chimique de la pile.

La figure 55 représente encore un long tube de verre contenant de l'air raréfié HH, et un autre tube habilement contourné pour dessiner le mot *Ruhmkorff*, et dans lequel il ne reste que des traces d'air. Aux extrémités de ces tubes sont ajustés des fils de métal que l'on fait communiquer respectivement avec les conducteurs E, E. A chaque oscillation de l'interrupteur B l'étincelle jaillit dans l'intérieur du tube, ce qui produit un bel effet dans l'obscurité.

VII. Le magnétisme et le diamagnétisme.

La théorie du magnétisme imaginée par Ampère conduit encore à une conséquence parfaitement conforme à une classe de phénomènes qui ont été récemment découverts. Si le magnétisme est simplement l'orientation de courants électriques moléculaires, il ne doit pas être une propriété exclusive du fer et de ses combinaisons. Autrement il faudrait admettre que les atomes du fer fussent seuls capables d'acquérir la polarité électrique, ce qui est peu vraisemblable. Or il est bien reconnu aujourd'hui que tous les corps de la nature sont plus ou moins magnétiques, c'est-à-dire qu'ils produisent des effets explicables par des courants électriques moléculaires. Les différences que présentent les corps à ce point de vue tiennent à l'intensité de ces courants et à leur direction.

Dès 1828, Lebaillif trouvait que tous les corps

étaient soumis à l'action des aimants. Mais déjà avant lui, en 1778, Brugmanns avait observé un phénomène tout à fait inattendu, à savoir la répulsion du bismuth par un aimant. Ce métal était donc antagoniste du fer, qui, comme nous l'avons dit, est attiré par l'aimant.

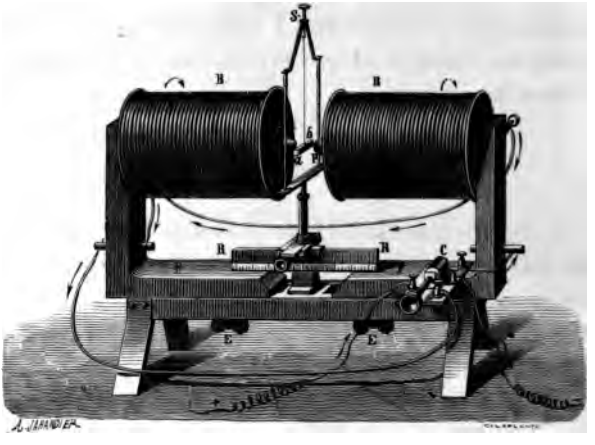

Fig. 56. — Appareil pour le diamagnétisme.

C'est Faraday qui découvrit la véritable loi de l'action des aimants sur tous les corps, et après lui de belles recherches ont accru considérablement nos connaissances sur ce sujet.

Il faut employer des aimants ou des électro-aimants très-puissants pour rendre appréciable cette action. La figure 56 représente l'appareil en usage. Le fer de l'électro-aimant BB a une forme telle que ses extrémités soient en ligne droite, et soient enve-

loppées par le fil conducteur du courant; les pôles P sont séparés par un intervalle de quelques centimètres, dans lequel on suspend par un fil de soie non tordu le corps *ab* que l'on veut soumettre à l'action du magnétisme. Lorsque le corps ainsi suspendu est en repos, on fait passer le courant dans le fil de l'électro-aimant, et on voit aussitôt le corps se mouvoir et se placer après quelques oscillations dans une position déterminée. On reconnaît que tous les corps se partagent en deux classes. Les uns sont attirés par l'aimant, comme le fer, et se placent suivant la ligne des pôles; les autres sont repoussés, comme le bismuth, et se placent perpendiculairement à la ligne des pôles. On appelle les premiers *paramagnétiques*, et les seconds *diamagnétiques*. Les uns et les autres présentent des pôles contraires à leurs extrémités, tant qu'ils sont soumis à l'influence de l'aimant; mais cette polarité n'est que temporaire, comme celle du fer pur; on ne connaît pas de substance diamagnétique qui conserve le magnétisme comme l'acier ou la pierre d'aimant, ou au moins les faits de ce genre qui ont été signalés n'ont-ils pas une grande certitude.

Faraday a prouvé d'une manière très-frappante que les substances diamagnétiques subissent une modification moléculaire, que leurs molécules s'orientent sous l'influence des aimants. Les extrémités polaires de l'électro-aimant étant creuses, on peut diriger un faisceau de rayons lumineux pola-

risés dans l'espèce de tube que forment ces extrémités, et interposer entre les pôles un corps diamagnétique transparent, tel que le *verre pesant*, sorte de verre contenant du plomb et du bore.

Dès qu'on fait passer le courant dans l'électro-aimant, on observe certaines modifications dans les propriétés des rayons qui ont traversé ce verre, comme si les positions de ses molécules avaient été changées. Ces modifications cessent dès que le courant ne passe plus; ce qui prouve que les molécules reprennent leurs positions ordinaires.

On ne saurait contester l'identité des causes du magnétisme ordinaire et du diamagnétisme; tous ces phénomènes sont dus à la force électrique, quel que soit le mécanisme moléculaire, quelle que soit l'espèce de mouvement que nous désignons par le mot vague de courant électrique.

L'idée d'une force unique présidant à ces transformations mystérieuses de l'énergie suffit pour qu'elles soit enchaînées entre elles, pour qu'on puisse les prévoir en appliquant le raisonnement à quelques principes simples, qui sont des vérités expérimentales; et par conséquent cette idée doit être acceptée, tant qu'on ne connaîtra pas de faits qui lui soient contraires. Aussi, pouvons-nous dire que la synthèse des phénomènes électriques est accomplie; nous n'avons plus à attendre des progrès de la science qu'une théorie mathématique, qui établisse toutes les lois numériques de ces phénomènes et les relations de ces lois, en partant de

quelques principes fondamentaux, suggérés par l'observation, et indépendants de toute hypothèse sur l'essence de la force électrique. Le jour où une telle théorie apparaîtra, un grand progrès sera réalisé ; il ne sera pas moins grand que ceux qui ont été réalisés au dix-huitième siècle par la théorie newtonienne, et de nos jours par la théorie mécanique de la chaleur.

C'est que si la gravitation explique le mouvement des masses visibles qui s'agitent dans l'espace, si la chaleur et la lumière jouent le rôle d'agents révélateurs entre ces masses, séparées les unes des autres par des distances immenses, l'électricité présente un caractère non moins important. Par elle, l'énergie se transmet, se conserve, se transforme. Si les phénomènes électriques ne semblent pas, au premier coup d'œil, aussi universels que les autres phénomènes physiques, c'est que nous les connaissons depuis hier seulement, et que notre attention a dû se porter d'abord sur les corps terrestres, afin que nous puissions y découvrir les lois de l'électricité, en les soumettant aux investigations du laboratoire. Mais déjà nos observations s'étendent : l'électricité atmosphérique, le tonnerre, la direction des boussoles, les aurores boréales s'expliquent par les principes que nous ont révélés nos expériences ; nous quittons même notre humble planète, et nous trouvons la trace des actions électriques jusque dans les astres où elles étaient jusqu'à présent ignorées. L'aiguille

aimantée, éloignée de tout corps magnétique capable d'agir sur elle, éprouve des variations périodiques qui sont en relation avec les déplacements de la terre par rapport au soleil, et même on a remarqué une relation entre quelques-unes de ces variations et la distribution des taches du soleil; il semble que l'amplitude des variations diurnes croisse et décroisse avec le nombre des taches solaires. On a d'abord assimilé la terre et le soleil à de puissants aimants; Ampère a substitué à cette hypothèse celle de courants électriques, développés par l'inégale chaleur que le soleil donne aux diverses parties de la surface terrestre pendant sa rotation diurne. Car on sait depuis 1821, d'après une découverte due à Seebeck, de Berlin, que la chaleur seule suffit pour produire l'électricité. Sans doute nous ignorons quel est le rôle astronomique de l'électricité; mais tout porte à croire qu'il existe réellement, et que les perfectionnements sans cesse apportés dans nos moyens d'observation mettront un jour l'homme en possession de nouvelles vérités qui ne sont pas même soupçonnées aujourd'hui.

CHAPITRE VIII

LES THÉORIES ET LES HYPOTHÈSES

I. Résumé des notions acquises sur les forces.

Nous voici arrivés au terme d'un long voyage à travers des régions pleines de grandeur et de mystère. Ici nous avons pu contempler la nature dans une pleine lumière, là des ombres nous ont caché mille détails que la rapidité de notre course voilait à nos regards; ailleurs il y avait d'épaisses ténèbres, et notre curiosité était déçue; puis la satisfaction faisait place à l'ennui à l'aspect d'un bel horizon qui tout à coup s'ouvrait devant nous. Maintenant nous pouvons passer en revue ces tableaux divers, les faire reparaître dans notre souvenir, essayer d'en saisir les analogies et les différences, étudier leurs contrastes, et retirer de notre excursion d'utiles enseignements. Plus tard, cher lecteur, votre souvenir deviendra peut-être confus;

ces mille phénomènes que vous avez vus isolément se confondront sans doute dans votre pensée ; mais si un enseignement persiste, si une vérité reste imprimée dans votre esprit, votre excursion aura été féconde, vous n'aurez à regretter ni la fatigue, ni les instants de faiblesse où votre courage semblait se ralentir.

Si, au contraire, vous aimez assez la nature, pour essayer d'y lire vous-même les grandes lois qu'y a tracées la main du Créateur, peut-être le voyage que nous aurons fait ensemble fortifiera-t-il vos généreux désirs, et vous déterminera-t-il à entreprendre de nouvelles études, plus approfondies, sur les phénomènes de l'univers.

Nous avons reconnu que tous les corps qui gravitent dans l'espace s'attirent deux à deux suivant une même loi, quelles que soient leurs distances mutuelles et les corps interposés. C'est, en effet, une remarquable particularité de la gravitation universelle, que deux corps situés, par exemple, aux deux extrémités d'un diamètre du globe terrestre s'attirent comme si le globe n'existait pas. En outre, l'attraction mutuelle de deux corps est toujours la même quand ils sont à la même distance. Elle est aussi la même, pour la même distance, entre les corps qui ont les mêmes masses, quelle que soit leur nature. Nous dirons que la force de gravitation, ou *force gravifique*, agit sur la masse des corps, et que son intensité est *constante*.

Les corps apparaissent comme des assemblages

de molécules qui ne se touchent pas. Elles sont maintenues dans des positions déterminées sous l'influence de forces, parmi lesquelles se trouve une force attractive. Cette force unit les molécules d'un même corps, et elle a reçu le nom particulier de *force d'attraction moléculaire*, mais rien ne prouve qu'elle ne soit pas un second degré de la force de gravitation.

Les molécules sont des assemblages de parties plus simples que nous avons appelées *atomes*, et qui sont aussi maintenues dans des positions déterminées, sous l'empire de forces, parmi lesquelles nous retrouvons une force d'attraction que les chimistes appellent *affinité*. Rien ne prouve qu'elle ne soit pas un troisième degré de la force de gravitation.

Lorsque les parties d'un assemblage corporel éprouvent des changements de position qui ne dépendent que de ces forces, les unes se rapprochent, les autres s'éloignent, de sorte que leur attraction agit, soit comme *puissance motrice*, soit comme *résistance*. Il y a égalité entre la somme des *travaux moteurs* et celle des *travaux résistants*.

Mais rarement le phénomène ne dépend que de la force de gravitation et de celles qui s'y rattachent. Ordinairement la force calorique est mise en jeu, et les quantités de chaleur qui apparaissent ou disparaissent sont proportionnelles à certaines quantités de travail moteur ou résistant, nous avons vu que le travail et la chaleur sont deux formes équi-

valentes de l'énergie, et que l'énergie se conserve dans un système de corps, en y subissant des transformations.

La force calorique est antagoniste de la force d'attraction moléculaire; elle s'oppose à ce que les molécules et les atomes se rapprochent jusqu'au contact, elle les maintient à des distances déterminées. Un de ses caractères essentiels est la variabilité de son intensité dans le même corps. Ce sont ses variations qui déterminent le changement des distances inter-moléculaires. La force calorique établit une action mutuelle, appelée *rayonnement*, entre deux corps différents, par laquelle son intensité tend à s'équilibrer entre eux, diminuant dans l'un et augmentant dans l'autre. Cette action est modifiée essentiellement par l'interposition d'un corps. Les variations d'intensité de la force calorique sont accompagnées d'apparition et de disparition de chaleur, avec ou sans travail mécanique ; mais l'énergie se conserve toujours.

Enfin la force calorique agit sur les atomes et les molécules indépendamment de leur masse et de leur nature. Cela résulte de la loi de Dulong sur la chaleur spécifique des corps simples.

La force électrique présente beaucoup d'analogie avec la précédente au point de vue du mouvement. Son intensité est variable par tous les degrés dans le même corps. Les variations de son intensité provoquent une sorte de mouvement qu'on appelle le *courant*. Elle produit tantôt l'attraction, tantôt la

répulsion, ce qui est un caractère distinctif. Elle agit sur les molécules, indépendamment de leur masse, en les polarisant et les disposant à se grouper d'une manière déterminée suivant leur nature. En général la force électrique préside à l'orientation des atomes.

La force de gravitation et la force électrique se manifestent par deux sortes d'effets, ceux de l'équilibre et ceux du mouvement des masses visibles. Un corps soumis à l'une de ces forces et maintenu en repos par un obstacle conserve en lui une certaine énergie. Lorsqu'il cède ensuite à l'action de la force, il dépense de l'énergie et l'on retrouve toujours cette énergie dans le corps ou dans les corps voisins, soit sous la même forme, soit sous une forme différente ; au contraire lorsque la force agit comme résistance, le corps gagne de l'énergie en se déplaçant. Il y a entre les effets de ces deux forces des différences très-grandes qui proviennent de ce que leur intensité est constante pour l'une et variable pour l'autre.

II. La méthode expérimentale et les théories.

Les considérations générales que nous venons de présenter, et qui résument l'étude que nous avons faite des phénomènes physiques, sont indépendantes de toute hypothèse sur la nature de la force ; elles ont pour base une définition de la force qui n'est autre chose qu'une conséquence de l'a-

valentes de l'énergie, et que l'énergie se conserve dans un système de corps, en y subissant des transformations.

La force calorique est antagoniste de la force d'attraction moléculaire ; elle s'oppose à ce que les molécules et les atomes se rapprochent jusqu'au contact, elle les maintient à des distances déterminées. Un de ses caractères essentiels est la variabilité de son intensité dans le même corps. Ce sont ses variations qui déterminent le changement des distances inter-moléculaires. La force calorique établit une action mutuelle, appelée *rayonnement*, entre deux corps différents, par laquelle son intensité tend à s'équilibrer entre eux, diminuant dans l'un et augmentant dans l'autre. Cette action est modifiée essentiellement par l'interposition d'un corps. Les variations d'intensité de la force calorique sont accompagnées d'apparition et de disparition de chaleur, avec ou sans travail mécanique ; mais l'énergie se conserve toujours.

Enfin la force calorique agit sur les at[illegible] les molécules indépendamment de le[illegible] de leur nature. Cela résulte [illegible] la chaleur spécifique [illegible]

La force élec[illegible]
avec la pré[illegible]

xiome : *il n'y a pas d'effet sans cause*. Nous sommes donc restés fidèles aux règles fondamentales de la méthode expérimentale telle qu'elle a été pratiquée par Galilée, exposée et développée par Bacon.

Il ne sera pas inutile de rappeler ces règles, dans ce qu'elles ont d'essentiel.

Chaque phénomène qui frappe nos sens doit d'abord être soumis à une observation attentive; on doit distinguer les circonstances qui y concourent et étudier chacune d'elles afin de savoir dans quelle mesure elle influe sur le phénomène. Pour mieux connaître cette mesure, on imagine une expérience, sorte de modification du phénomène, dans laquelle la circonstance que l'on veut étudier est prépondérante, et des appareils qui augmentent la puissance de nos organes, et nous permettent d'évaluer avec précision toutes les quantités mesurables de l'expérience. La comparaison des nombres obtenus nous conduit ensuite à formuler une loi en langage mathématique; le phénomène considéré est ordinairement le résultat de plusieurs lois ainsi obtenues.

Pour expliquer le phénomène, il faut le décrire dans tous ses détails en énonçant les lois qui y président. C'est par des explications de ce genre que doit toujours commencer l'étude de la physique. Elles sont en quelque sorte celles du premier degré.

En voici un exemple. Galilée observe un jour dans la cathédrale de Pise l'oscillation d'un lustre suspendu à la voûte; il veut connaître ce phénomène, et il invente le pendule. Ayant suspendu

divers corps à l'aide de fils, il les fait osciller, et compte leurs oscillations. Les circonstances qui lui semblent pouvoir jouer un rôle dans le phénomène sont la longueur du fil, la masse du corps, l'écart primitif donné au système, quand on le dérange de sa position naturelle d'équilibre. Dès lors il imagine trois expériences, et chacune d'elles lui fait découvrir une loi.

1re Expérience. Il suspend deux billes identiques à deux fils dont l'un a une longueur quadruple de l'autre ; il observe que le pendule le plus court effectue deux fois plus d'oscillations que l'autre dans le même temps. De là une loi restée célèbre : les carrés des nombres d'oscillations exécutées par deux pendules de longueurs différentes sont inversement proportionnels aux longueurs. Ce qui veut dire : pendant que le pendule de longueur 4, 9, 16, etc., effectue 1 oscillation, l'autre de longueur 1 en effectue 2, 3, 4, etc.; nombres dont les carrés sont 4, 9, 16, etc.

2me Expérience. Le même pendule étant en repos, il dispose un cercle gradué dans un plan vertical, à côté du pendule, et place le centre du cercle à la hauteur du point de suspension du fil (fig. 57). Puis il écarte le fil de la verticale, et mesure sur le cercle le nombre de degrés d'écartement ; il abandonne le pendule, et il compte ses oscillations dans un temps déterminé. Il trouve que ce nombre est toujours le même, quel que soit l'écart, pourvu que celui-ci ne soit pas trop grand. De là une seconde

loi : la durée de l'oscillation très-petite est indépendante de l'amplitude ; de sorte que les oscillations ont toujours la même durée, depuis le commencement de l'expérience jusqu'à ce que le frottement

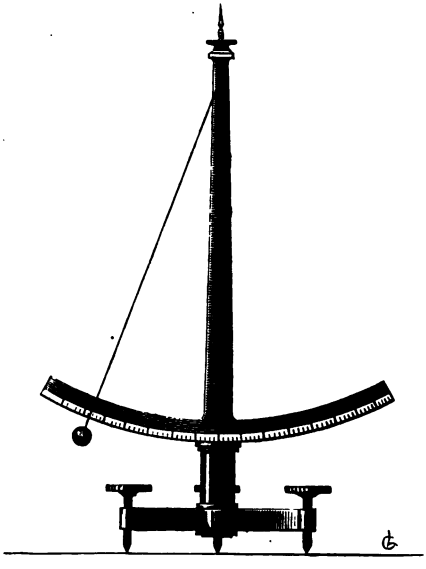

Fig. 57. — Pendule de Galilée.

de l'axe et la résistance de l'air aient ramené le pendule au repos.

3me Expérience. Des boules de diverses subtances sont suspendues au même fil ; on trouve que la durée de l'oscillation est la même pour toutes ; de là une troisième loi : la durée de l'oscillation très-

petite d'un pendule est indépendante de la nature du corps oscillant.

Ainsi Galilée découvre trois lois dont l'ensemble fait connaître le phénomène de l'oscillation pendulaire. Mais il faut remarquer que ces trois lois supposent l'oscillation très-petite, de sorte qu'elles ne sont pas générales. Il fallut donc faire de nouvelles recherches pour découvrir les lois plus générales dont les précédentes dérivent comme conséquences particulières. C'est ce qu'on a fait après Galilée, et aujourd'hui l'oscillation pendulaire est un des phénomènes les mieux connus de la physique.

Lorsqu'on a l'explication du premier degré d'un phénomène, on procède à sa comparaison avec d'autres phénomènes déjà connus, et l'on cherche quels sont ceux qui sont dus à la même cause; parmi eux se trouvent toujours un ou plusieurs phénomènes simples, auxquels on peut rattacher par le raisonnement celui qu'on considère. Les lois qu'on vient de découvrir deviennent ainsi des conséquences rationnelles de lois simples, embrassant un très-grand nombre de phénomènes, et qu'on peut appeler *lois générales*. Montrer cet enchaînement rationnel, c'est donner une explication plus complète du phénomène; c'est en quelque sorte une explication du second degré.

Nous allons continuer l'exemple précédent, pour développer notre pensée.

L'oscillation du pendule est due à la même cause que la chute des corps terrestres. En effet, il

résulte des lois de cette chute que tout corps est sollicité à se mouvoir vers la terre, suivant la verticale, en vertu d'une attraction qui est à peu près constante, lorsqu'on ne considère qu'une chute de petite hauteur. Lorsque le fil du pendule est vertical, l'attraction de la boule produit seulement une déformation temporaire du fil. Par suite de cette déformation, les molécules de ce fil sont dérangées de leurs positions ordinaires, et les forces moléculaires sont mises en jeu. Elles produisent un effort sur la boule qu'on appelle la réaction du fil, et qui équilibre l'attraction terrestre. Le fil étant ensuite écarté de la verticale, l'attraction n'agit plus dans sa direction; la réaction du fil est moindre que précédemment, et une partie de l'attraction est seule équilibrée. L'autre partie agit alors pour faire descendre la boule, et comme le fil ne peut pas s'allonger notablement, la boule décrit à peu près un arc de circonférence dont le centre est au point de suspension. A mesure que le fil s'approche de la verticale, la force motrice diminue, et on démontre, par le raisonnement mathématique, qu'elle est à chaque instant proportionnelle à la distance qui sépare le centre de la boule de sa position d'équilibre.

En continuant le raisonnement, on trouve par le calcul les diverses circonstances du mouvement pendulaire, telles qu'elles se présentent dans les expériences de Galilée. Il est donc démontré que l'attraction universelle est la cause de ce genre de

phénomènes, et l'explication du second degré consiste à donner cette démonstration. Un ensemble d'explications de ce genre constitue une *théorie physique*.

C'est en suivant cette méthode que nous sommes arrivés à ranger tous les phénomènes physiques en trois classes, correspondant à trois causes ou forces distinctes. C'est une sorte de classification naturelle que nous faisons, et son degré de certitude est essentiellement subordonné à l'état de nos connaissances actuelles. Nous la préférons à une autre, parce qu'elle nous paraît actuellement plus simple; mais nous ne pouvons affirmer qu'elle persistera dans l'avenir; elle est donc provisoire, et tel sera toujours le caractère des connaissances humaines fondées sur l'usage de nos sens.

III. Les fluides impondérables.

Le mode d'enchaînement des faits, qui est le propre de la méthode expérimentale, est-il le dernier degré du travail intellectuel qu'il soit donné à l'homme d'accomplir? N'est-il pas possible de remonter plus haut encore dans l'échelle des causes, de connaître l'essence même de la force? En d'autres termes, la méthode expérimentale est-elle toute la science?

Interrogeons le passé, avant de répondre catégoriquement à cette question. Nous mettrons à profit les erreurs auxquelles elle a donné lieu, et nous

préparerons le terrain sur lequel nous devons la transporter.

La curiosité de l'esprit humain a toujours été vivement excitée par le spectacle du monde visible ; il a cherché dans tous les âges à en découvrir les harmonies secrètes, et, s'enorgueillissant de la plus petite découverte, il a souvent cru posséder le secret de la création, tandis qu'entouré des épaisses ténèbres de l'ignorance, il ne promenait sa pensée que dans un monde imaginaire.

L'une des tendances les plus naturelles de notre esprit consiste à vouloir figurer les causes premières des phénomènes. On veut *voir* un agent intermédiaire opérant une modification donnée ; par exemple, une source de chaleur agit sur un corps solide ; on observe un accroissement de volume de ce dernier, une fusion, une vaporisation ; on veut se représenter les molécules du corps recevant quelque chose qui les déplace et on imagine une manière d'être de la chaleur, qui soit conforme aux notions acquises à l'aide des sens sur les mouvements ordinaires des corps visibles. C'est ainsi qu'est née l'hypothèse du *fluide calorique* qui a été acceptée longtemps par les physiciens, pour expliquer la nature de la chaleur. Ce fluide était formé de particules impondérables, c'est-à-dire n'obéissant pas à la force d'attraction universelle, se repoussant mutuellement et attirant les molécules des corps. Une source de chaleur émettait ce fluide, qui, rencontrant ensuite un corps, pouvait rebondir à sa sur-

face, rester emprisonné dans son intérieur, ou bien le traverser. En appliquant au mouvement de ce fluide idéal les principes de la mécanique des corps ordinaires, on réussissait à en déduire les principaux phénomènes de la chaleur.

Cette hypothèse répondait-elle au désir qui l'avait inspirée? On voulait voir, donner une forme à la chaleur, et que faisait-on? on dotait les particules du fluide calorique d'une répulsion mutuelle et d'une attraction sur les molécules des corps? Quelle était la cause de ces deux forces? On ne la figurait pas; on l'admettait sans pousser plus loin la méthode figurative. Évidemment on reculait la difficulté sans la résoudre.

Les découvertes expérimentales ont condamné définitivement cette hypothèse, de même que celle du *fluide lumineux* qui avait été inventée parallèlement à l'autre, pour l'explication de la cause de la lumière. La fausseté de ces conceptions est évidente de nos jours, et pourtant des hommes de génie tels que Newton l'ont adoptée!

Les fluides impondérables ont joué un grand rôle dans les théories physiques. Lorsqu'un phénomène nouveau était découvert, on cherchait à l'expliquer d'abord à l'aide des fluides déjà admis dans la science; puis, si l'explication paraissait impossible, on dotait l'un de ces fluides de qualités nouvelles, on l'habillait en quelque sorte pour l'adapter à la nouvelle découverte; c'est ce qu'ont fait les partisans du système de Newton pour la lumière, à me-

sure que Young, Malus, Brewster, Arago, Fresnel, Biot découvraient les remarquables phénomènes de la diffraction, de la double réfraction et de la polarisation. Les hypothèses s'entassaient ainsi les unes sur les autres dans la théorie de l'émission, et le jour où Fresnel formula définitivement une théorie plus simple, l'ancienne théorie fut condamnée sans retour.

L'électricité a eu le privilége de suggérer aux physiciens du siècle dernier un assez grand nombre de fluides impondérables. L'abbé Nollet voyait dans les lueurs qui apparaissent fréquemment à la surface des corps électrisés la matière électrique entrant ou sortant; il assignait les points d'entrée et de sortie, appelant affluences et effluences ces deux mouvements simultanés, et il expliquait la plupart des faits connus de son temps avec une certaine facilité de langage. Les attractions et répulsions étaient pour Nollet le résultat des impulsions données par le mouvement des particules électriques. Mais la découverte de la bouteille de Leyde jeta son système dans le discrédit, et d'autres hypothèses un peu moins grossières prévalurent.

Suivant Franklin, il y avait un fluide électrique impondérable, dont les particules se repoussaient et attiraient les molécules pondérables des corps. Lorsque la quantité de ce fluide renfermé dans un corps était en quantité convenable, le corps était à l'état naturel; lorsqu'elle était plus grande ou moins grande, le corps était électrisé positivement

ou négativement. C'est cette idée qui a amené l'emploi des mots *électricités positive et négative*, bien que de nos jours ils n'indiquent plus qu'une opposition d'effets, sans idée préconçue sur la nature de l'électricité. On se figure aisément, avec l'hypothèse de Franklin, la neutralisation des électricités contraires de deux corps mis en contact ; l'excès de fluide de l'un d'eux passe simplement dans l'autre. La répulsion de deux corps ayant la même électricité est le résultat de la répulsion des particules du fluide et de leur combinaison avec les corps ; enfin, l'attraction de deux corps ayant des électricités contraires s'explique par des mouvements que le fluide imprime à l'air en cherchant à se mettre partout en équilibre. Il est facile de voir que plusieurs faits sont contraires à cette hypothèse ; par exemple, elle n'explique pas comment les attractions et répulsions des corps mauvais conducteurs ont lieu dans le vide. Mais une objection plus grave encore vint détruire ce système qui d'abord avait été très-bien accueilli. Œpinus le soumit au calcul, et il trouva que pour expliquer la répulsion des corps électrisés négativement, il fallait admettre que les molécules pondérables des corps fussent douées d'une répulsion mutuelle, et non d'une attraction, ce qui est contraire à tous les phénomènes moléculaires.

Puisqu'on ne réussissait pas à tout figurer avec un seul fluide, on en imagina deux ; et, en leur attribuant un bon nombre de qualités spécifiques,

Symmer obtint un résultat assez satisfaisant. On voit, par le développement même de ces théories, ce qu'elles ont de forcé et d'irrationel. Avec de grands efforts d'imagination, on a fini par inventer un mécanisme qui imite grossièrement les phénomènes électriques, comme un automate imite la vie. Et pourtant cette imitation a recueilli tous les suffrages pendant longtemps, comme une explication vraisemblable, et de nos jours encore, bien qu'on ne l'accepte plus que comme un procédé mnémonique, qui facilite l'enchaînement des phénomènes électriques, elle est en usage dans l'enseignement. Ne vaudrait-il pas mieux la supprimer définitivement, et revenir franchement à la méthode expérimentale?

Voici en quoi consiste l'hypothèse de Symmer. Il existerait dans tous les corps deux fluides impondérables qui s'y trouveraient naturellement en quantités égales et combinés intimement. Les particules du même fluide se repousseraient mutuellement; celles de l'un attireraient celles de l'autre; enfin ces particules attireraient les molécules pondérables des corps. Dans les corps conducteurs ces fluides pourraient facilement se mouvoir, ce qui n'aurait pas lieu dans les corps bons conducteurs.

Électriser un corps, ce serait séparer les deux fluides et rendre l'un d'eux prépondérant. Celui qui se trouverait en excès dans le verre poli, frotté avec de la laine, a reçu le nom de fluide positif: l'autre est appelé fluide négatif.

Cette hypothèse permet de se figurer la plupart des phénomènes électriques. Poisson l'a soumise au calcul, et a établi une admirable théorie mathémathique dont les formules représentent fidèlement les résultats des expériences que Coulomb avait faites antérieurement sur l'influence électrique, et sur la distribution de l'électricité dans les corps bons conducteurs ; c'est à ces beaux travaux que nous devons certainement la faveur dont ce système jouit encore de nos jours. La découverte de Volta ne l'a pas ébranlée; l'assimilation d'une pile à une batterie électrique qui aurait en elle-même la faculté d'engendrer l'électricité, est tout à fait conforme à l'hypothèse des fluides. Mais à mesure que la science expérimentale apportait des faits nouveaux et en donnait les lois, les fluides devenaient insuffisants, et les physiciens ont dû les abandonner, en ne les regardant plus que comme un symbolisme, utile quelquefois pour aider la mémoire.

Nous remarquerons que l'hypothèse de Symmer suppose l'existence de trois forces : une répulsive entre les particules du même fluide ; une attractive entre les particules de l'un des fluides et celles de l'autre; enfin, une attractive entre ces particules et les molécules des corps. Or le fait principal qu'on cherche à se figurer, c'est la polarité électrique; on recule donc le problème sans le résoudre, puisque, si l'on réussit à se figurer la cause de cette polarité, on ne se figure point la cause des

attractions et répulsions qu'admet l'hypothèse.

Les phénomènes magnétiques ont été longtemps attribués à une cause distincte de celle des phénomènes électriques, et l'histoire de cette partie de la physique nous offre aussi une foule de systèmes ayant le même caractère que les précédents. Les anciens ont imaginé un fluide dont l'émission produirait l'effet du vide entre un aimant et le fer. C'est après les découvertes de Gilbert, contemporain de Galilée, qui l'appelle *grand à faire naître l'envie*, que les explications commencent à être sérieuses. Coulomb supposait qu'il existe dans les aimants deux fluides impondérables, doués de propriétés analogues à celles des fluides électriques, mais différant de ces derniers en ce qu'ils ne se trouvent pas dans tous les corps, et qu'ils ne peuvent se mouvoir que dans des portions excessivement petites ou éléments de l'espace occupé par l'aimant. Les fluides sont naturellement combinés dans les éléments du fer, et l'aimantation consiste dans leur séparation au sein de chaque élément. Une force particulière, appelée force coercitive, existerait en outre dans la pierre d'aimant et dans l'acier, qui expliquerait la conservation du magnétisme dans ces corps. Poisson a traité cette hypothèse par le calcul, et l'accord de ses formules avec l'expérience est aussi satisfaisant que possible, ce qui a mis en honneur les fluides magnétiques au même titre que les fluides électriques.

Nous avons vu comment les découvertes d'Am-

père ont ramené le magnétisme à la même cause que l'électricité. L'hypothèse de Coulomb devient donc inutile.

IV. L'éther. — Les ondulations.

A côté des fluides impondérables, agissant sous l'empire de plusieurs forces inconnues, qu'il est impossible de figurer, nous trouvons des conceptions plus simples, par lesquelles on a cherché à expliquer le mécanisme des phénomènes par des mouvements invisibles qui suivent les lois connues du mouvement visible. On trouve des systèmes de ce genre depuis l'antiquité grecque, où Épicure imaginait une doctrine chantée plus tard par Lucrèce, dans son poëme : *de Natura rerum*, jusqu'à nos jours, où quelques savants cherchent à se figurer l'univers comme un assemblage de masses visibles, obéissant à l'impulsion de masses infiniment ténues et invisibles, qui parcourent l'espace dans tous les sens avec d'énormes vitesses, et produisent, par leur rencontre avec les premières, tous les effets de la gravitation, de la chaleur, de la lumière, de l'électricité.

Descartes avait imaginé le système des tourbillons ; pour lui l'univers matériel était constitué par des amas de particules invisibles gravitant autour de certains centres, et de corps visibles obéissant aussi à une loi générale de gravitation. Les lois ordinaires de la mécanique étant appliquées à cette

hypothèse, il retrouvait par le raisonnement mathématique quelques-uns des faits connus. Mais, à côté de quelques images plus ou moins fidèles, on trouve dans les ouvrages de ce grand philosophe les erreurs les plus étranges. C'est que, loin de suivre la méthode expérimentale, il voulait appliquer à l'édification du monde matériel la méthode rigoureuse qui lui avait si bien servi à édifier le monde moral. Il voulait connaître avant tout les causes premières des phénomènes, et partir de ces causes pour reconstruire l'univers mathématiquement. Il dédaignait Galilée, et disait : « Avant de chercher les lois de la pesanteur, il faut que je sache ce qu'est la pesanteur ; car c'est la cause qui doit expliquer les effets. »

Descartes était grand philosophe, quand il s'agissait de Dieu et de l'âme ; il était mauvais physicien quand il traitait la question des choses sensibles, parce qu'il voulait rejeter à tout prix les notions acquises à l'aide des sens, et déduire les choses corporelles des choses spirituelles. Ses erreurs en physique sont les conséquences de l'usage exclusif qu'il faisait de la méthode déductive.

En ce qui concerne les choses corporelles, la méthode inductive doit marcher de front avec l'autre, celle-ci fournissant un moyen sûr de contrôle et de découverte. Lorsque les jugements fondés sur nos sensations nous ont conduits à soupçonner une loi, nous devons déduire de cette loi toutes ses conséquences rationelles ; alors nous retrouvons comme

résultat du raisonnement tantôt des faits connus, tantôt des prévisions qu'il faut justifier par de nouvelles expériences. Lorsque cette justification est complète, de nouveaux faits sont venus agrandir le domaine de la science et donner un degré de probabilité de plus à la loi soupçonnée. Mais une loi ainsi acquise n'est pas une vérité absolue; elle est nécessairement provisoire, et la découverte de faits ignorés jusqu'alors peut la faire rejeter plus tard. Vouloir ne tenir aucun compte de l'observation des choses corporelles, c'est trop préjuger de la puissance de l'esprit humain; telle est l'erreur de Descartes ; nous verrons qu'il n'est pas moins dangereux de ne s'appuyer que sur l'observation du monde corporel pour remonter des effets aux causes, sans tenir compte des notions acquises dans l'ordre moral. C'est l'erreur de quelques physiciens, qui deviennent par là matérialistes, souvent sans le vouloir.

Les tourbillons de Descartes n'ont pas été acceptés dans la science moderne, même comme symbolisme; mais le système des ondulations, qui est aujourd'hui en grande faveur sous ce dernier point de vue, présente un caractère analogue. On veut toujours se figurer les phénomènes de la chaleur, de l'électricité, de la lumière, comme les effets du mouvement de particules invisibles, impondérables, distinctes des molécules corporelles et répandues comme ces dernières dans l'espace. On appelle *éther* ces particules invisibles ; on

imagine que chacune d'elles oscille autour d'une position moyenne, comme si elle était liée à cette position par une force particulière; l'espace est rempli de ces particules d'une ténuité excessive; elles pénètrent tous les corps, agissent sur les molécules corporelles, et aussi les unes sur les autres, exactement comme les molécules agissent entre elles dans le phénomène des vibrations visibles qui, en se transmettant à notre oreille, y produisent la sensation du son; mais la rapidité de leur oscillation est énormément plus grande. C'est surtout à la lumière qu'on a appliqué cette hypothèse depuis les beaux travaux d'Huyghens, Young et Fresnel.

Il est en effet difficile de mieux figurer les phénomènes de la réflexion, de la réfraction, de la dispersion, de la diffraction et de la polarisation, qu'ont fait ces illustres physiciens. Depuis que Fresnel a développé cette théorie avec le secours de l'analyse mathématique, elle donne une image de tous les phénomènes connus, avec leurs lois numériques et leurs détails les plus minutieux. Aussi est-elle le type le plus parfait d'une théorie symbolique, destinée à faire bien connaître un ensemble de faits qui dépendent évidemment d'une même cause. Elle est si précise, qu'il est difficile de ne pas y recourir, même à ceux qui la rejettent comme explication de l'essence de la lumière. Non-seulement elle s'est montrée conforme à tous les faits connus, mais elle a fait prévoir et découvrir un grand nombre de lois et de

phénomènes nouveaux. C'est qu'indépendamment de sa base tout hypothétique, elle possède au plus haut degré le caractère d'une théorie mathématique, rattachant entre elles les lois de la lumière à l'aide de formules qui sont vraies en toute hypothèse ; elle se rapproche par là de la théorie électro-dynamique d'Ampère. Voudrait-on substituer à l'hypothèse de l'éther une autre conception mieux appropriée aux exigences de la philosophie, cette conception conduirait certainement par d'autres raisonnements aux principales formules de la théorie des ondulations.

J'essayerai de développer ce que cette théorie présente d'essentiel, ne voulant rien lui ôter de sa valeur et de son utilité. On comprendra mieux pourquoi il est avantageux de l'employer comme moyen figuratif, à condition toutefois de ne pas la prendre comme l'expression d'une réalité.

Lorsqu'on touche en un point une surface d'eau tranquille, on voit une proéminence circulaire se former autour de ce point comme centre, puis s'éloigner peu à peu, son rayon croissant uniformément. Que se passe-t-il réellement à la surface du liquide ?

Au point touché on produit d'abord une dépression, l'eau environnante forme une sorte de bourrelet autour de la dépression, de sorte qu'il y a d'une part abaissement des certaines molécules, d'autre part élévation des molécules voisines : cela résulte de la faible compressibilité de l'eau et du

temps que l'impulsion met à se propager : il faut que le volume de l'eau qui reçoit cette impulsion ne change pas. Les molécules sont ainsi soulevées jusqu'à une certaine distance du centre d'ébranlement, à l'instant où l'ébranlement cesse d'arriver du dehors. Considérons à cet instant une couche liquide située au dehors et au pied de la proéminence circulaire. Cette couche commence à s'élever à mesure que le liquide plus rapproché du centre redescend en vertu de la pesanteur; elle se retrouve bientôt à une hauteur telle que la pesanteur a pu détruire l'effet de la vitesse acquise ; elle s'arrête alors, et forme une proéminence circulaire nouvelle, tandis que la précédente n'existe plus. On peut dire que celle-ci s'est affaissée sur elle-même par l'effet de la pesanteur, et qu'elle a soulevé l'eau autour d'elle par l'effet des forces moléculaires. La seconde proéminence retombe à son tour, en transmettant l'impulsion à la couche d'eau qui l'environne ; celle-ci forme donc une troisième proéminence d'un rayon plus grands et ainsi de suite. La continuité de ces effets produit sur l'œil de l'observateur l'apparence connue.

On appelle onde liquide la largeur de la proéminence et on dit dans un langage figuré que l'onde se propage uniformément autour du centre d'ébranlement. Remarquons que chaque molécule liquide acquiert une certaine quantité d'énergie à l'instant où l'onde l'atteint, et qu'elle transmet ensuite cette énergie à une molécule voisine en retombant. La

propagation de l'énergie se fait ainsi par les ondulations sans perte ni gain.

Imaginez maintenant que le centre d'ébranlement soit de nouveau déplacé de la même manière que précédemment à l'instant où il allait rentrer au repos, et que le même effet continue à se produire. Chacune des impulsions données au centre produira une onde; vous aurez une suite d'ondes se succédant uniformément, et la surface de l'eau présentera des proéminences circulaires également espacées, qui sembleront passer successivement en chaque point de la surface par un mouvement centrifuge; une molécule liquide située en ce point sera donc alternativement soulevée et abaissée d'une manière continue; elle oscillera de part et d'autre d'une position moyenne, dans le sens de la verticale.

Lorsque nous entendons un son, il y a quelque part près de nous un corps qui vibre, c'est-à-dire dont les molécules oscillent régulièrement autour d'une position moyenne ; puis entre ce corps et notre oreille il y a un milieu pondérable, tel que l'air atmosphérique, qui transmet le mouvement vibratoire exactement comme dans le phénomène précédent. Concevez une ligne droite allant à travers l'air de votre oreille au corps sonore, et une molécule d'air sur cette droite ; elle reçoit successivement chaque impulsion donnée par ce corps et elle la transmet à la molécule suivante. Vous pouvez vous figurer les ondes sonores qui passent par cette molécule, et qui la font osciller autour d'une posi-

tion moyenne. Le mécanisme de cette propagation de mouvement est celui des ondes liquides.

La droite suivant laquelle le mouvement arrive à votre oreille est un rayon sonore, et il est maintenant facile de comprendre la variété des sons par les lois suivantes qui expriment les faits observés en acoustique.

Les longueurs d'onde sonore sont inversement proportionnelles aux nombres d'oscillations exécutées dans le même temps. Le son est d'autant plus aigu que la longueur d'onde est plus courte.

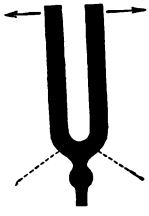

Fig. 58. — Diapason.

Le diapason normal est formé par une verge d'acier recourbée (fig. 58); quand on écarte ses branches l'une de l'autre, et qu'on les abandonne ensuite, les forces moléculaires les font osciller pendant quelque temps, jusqu'à ce que l'énergie donnée à la verge pendant l'ébranlement primitif soit complétement transmise aux corps environnants. Il y a alors 435 oscillations complètes exécutées en une seconde; l'onde sonore dans l'air a une longueur de 78 centimètres. Le son qu'on entend est la_3.

Prenez un autre corps sonore qui produise le son la_2; il exécutera deux fois moins d'oscillations que le précédent, et la longueur de son onde aérienne sera double.

Lorsque vous entendez un orchestre, votre oreille

reçoit simultanément les ondes émises par chacun des instruments. On peut dire que chacune de ces ondes est apportée par un rayon sonore, et distinguer les divers rayons par la longueur de l'onde ou le nombre des oscillations qu'il propage.

Eh bien, ce qui est une réalité lorsqu'il s'agit d'acoustique, devient une image dans la théorie de l'éther lumineux. Une source de lumière est comme l'orchestre, elle envoie des rayons lumineux, distincts les uns des autres par la longueur de l'onde éthérée ou le nombre des vibrations qu'ils propagent jusqu'à l'œil. Mais, pour figurer complétement les phénomènes de la lumière, il faut imaginer des proportions bien différentes. Pour la lumière rouge, par exemple, la théorie de l'éther admet que la longueur d'onde a $\frac{1}{16000}$ de centimètre et que le nombre des vibrations s'élève à 496 millions de millions par seconde.

Lorsqu'un rayon sonore aérien rencontre un corps, il y a réflexion, réfraction, etc. A chacun de ces phénomènes correspond un phénomène d'optique qui s'explique de la même manière. L'interférence de deux rayons s'interprète immédiatement : lorsqu'une molécule d'éther reçoit simultanément deux ondes dont l'une la sollicite à se mouvoir dans une direction et l'autre à se mouvoir dans la direction opposée avec la même vitesse, il est évident que la molécule reste en repos ; on se figure très-bien deux excitations lumineuses se neutralisant mutuellement.

Sur un rayon de lumière polarisée, les molécules décrivent en oscillant de petites lignes droites parallèles entre elles, ou bien elles décrivent de petites orbites circulaires ou elliptiques, toutes orientées de la même manière, tandis que sur un rayon ordinaire il n'y a aucune orientation dans les oscillations de l'éther. Tous les effets connus sont merveilleusement imités par l'emploi des règles de la mécanique.

L'hypothèse de l'éther convient aussi bien pour la chaleur rayonnante, que pour la lumière, puisque les lois sont identiques. Elle interprète aisément les transformations de l'énergie dont les corps sont le théâtre. D'une part, la création de la chaleur et de la lumière dans les combinaisons chimiques est la transmission du mouvement oscillatoire des atomes pondérables aux particules de l'éther répandu autour d'eux ; d'autre part, la séparation des molécules ou des atomes dans les changements d'état et dans les décompositions chimiques est figurée par la transmission du mouvement des particules de l'éther aux atomes corporels. Ce que nous appelons la chaleur sensible serait le mouvement oscillatoire et rotatoire des molécules pondérables, et il serait transmissible de l'éther aux molécules, et réciproquement. Plusieurs auteurs modernes ont développé ces hypothèses, et parmi eux je citerai M. Rankine en Angleterre, qui a pu en déduire une théorie mathématique des phénomènes de la chaleur.

Il importe de remarquer que l'hypothèse de l'éther, semblable en cela aux autres hypothèses, ne donne aucun moyen de se figurer la cause première des mouvements qu'elle imagine. Si chaque particule de l'éther oscille autour d'une position moyenne, suivant la loi pendulaire, elle est sous l'empire d'une force attractive, qui est à chaque instant proportionnelle à la distance qui la sépare de cette position, ou d'un système de forces capables de produire le même effet. Il faut nécessairement admettre avec l'éther une action mutuelle de ses particules, et aussi une action entre elles et les molécules pondérables. Quelle est l'essence de ces forces? l'hypothèse ne le dit pas. La difficulté est donc seulement reculée, et le mystère de la force n'est point pénétré.

L'éther pourrait-il servir à figurer les effets de l'électricité? N'est-il pas possible de lui attribuer quelques qualités de plus, afin qu'il devienne le fluide unique de Franklin? Si l'on veut bien reconnaître le caractère purement symbolique de cette substance conjecturale, la réponse ne peut être qu'affirmative. Aussi quelques tentatives ont été faites en ce sens. Mais leur utilité est très-contestable dans la physique proprement dite; il vaudrait mieux sans doute rester fidèle à la méthode de Galilée, chercher l'enchaînement naturel des lois physiques, abstraction faite de toute hypothèse sur la nature des causes; faire pour l'électricité ce que MM. Clausius, Hirn, Zeuner, ont fait pour la théorie meca-

nique de la chaleur, et laisser à la métaphysique la recherche des causes avec ses incertitudes et ses défaillances.

V. Danger et utilité des hypothèses.

Les réflexions qui précèdent s'appliquent surtout à l'enseignement des sciences. Pour éveiller la curiosité de l'homme mis en présence de la création, ne convient-il pas de lui faire connaître d'abord les vérités bien acquises que nous devons aux courageux efforts des générations passées, de lui révéler les harmonies bien connues de la nature, en lui laissant entrevoir ce qui est encore et ce qui sera probablement toujours mystérieux. Ne faut-il pas éviter les luttes stériles de l'esprit, en face de problèmes imaginaires, craindre d'affaiblir le goût des sciences d'observation par le spectacle des illusions dont l'homme peut être le jouet, ou de laisser confondre le rêve avec la vérité?

Que les hypothèses naissent, se développent et meurent dans le cerveau du penseur, lorsque son esprit a été d'abord sagement cultivé, et qu'il est devenu fort et vaillant devant l'erreur, cela doit arriver et peut être utile. Il sait ce que valent ces hypothèses; il s'en sert comme d'un instrument docile pour élargir son horizon, pour inventer de nouvelles expériences; mais il sait les abandonner dès qu'il s'agit de formuler le résultat de ses recherches. La loi d'un phénomène, telle qu'elle

s'offre à la pensée après des observations précises, est une parcelle de la sagesse divine; c'est elle seule qui persiste, le jour où l'hypothèse s'évanouit.

Nous avons passé en revue les principales hypothèses qui ont régné ou règnent encore dans la science. Aucune d'elles n'exclut l'idée de la force; aucune d'elles ne montre quelle est son essence. Ces hypothèses ont eu pour objet de donner une forme aux agents de la chaleur, de la lumière, de l'électricité. Mais il est remarquable qu'on n'ait pas appliqué la même méthode à la gravitation universelle. Depuis que Newton a formulé la loi d'attraction mutuelle des masses corporelles visibles, on a regardé cette loi comme le dernier mot de la science; aucun symbolisme n'a été introduit dans l'enseignement pour remonter à l'origine de l'attraction. Dans cette branche des sciences physiques, la méthode expérimentale a été rigoureusement suivie.

Depuis quelques années, il est vrai, plusieurs savants cherchent à expliquer l'attraction newtonienne, et par suite toutes les attractions, par le choc de particules invisibles contre les corps visibles. Pour nous cette hypothèse, qu'on appelle *théorie dynamique*, est un nouveau symbolisme, peut-être moins imparfait, dans certains cas, que ceux dont nous avons parlé, mais qui admet implicitement comme eux des actions non moins mystérieuses que celles de la théorie newtonienne. Il ail-

leurs cette théorie n'est pas encore formulée avec une assez grande précision, pour qu'on puisse actuellement la discuter convenablement ; il faut qu'elle soit développée avec le secours de l'analyse mathématique, afin qu'on puisse comparer les conséquences rationnelles aux résultats de l'observation. Jusque là elle restera vague et ne pourra inspirer une grande confiance. Mais quelle que soit l'opinion des philosophes sur cette hypothèse, elle aura incontestablement son utilité. Elle servira à découvrir de nouvelles lois, comme l'ont fait les hypothèses qui l'ont précédée. Le génie des physiciens, prenant son essor dans cette voie nouvelle, entrevoit déjà de nouveaux horizons, et les expériences que le *système dynamique* ne manquera pas de suggérer contribueront, nous n'en doutons pas, aux progrès de la philosophie naturelle.

VI. Le problème de la force.

L'origine et l'essence des forces ont toujours exercé la sagacité des penseurs, et les controverses semblent renaître sur ces questions, plus vives et plus passionnées que jamais.

Rappelons d'abord la définition du mot *force*.

Il est incontestable que les corps inanimés ne peuvent d'eux-mêmes entrer en mouvement s'ils sont en repos, ou rentrer au repos s'ils sont en mouvement. On ne saurait se refuser à accepter cette

proposition comme l'expression d'une loi expérimentale. Une autre vérité incontestable, c'est qu'il n'y a pas d'effet sans cause.

On appelle *force* toute cause capable de tirer un corps du repos, ou de l'y faire rentrer : les uns pensent qu'un corps ne peut changer d'état, sans qu'un mouvement préexistant soit transmis pendant le changement, et qu'il est inutile d'introduire dans la science l'idée de la *force;* les autres croient qu'un corps peut changer d'état sans mouvement préexistant, sous l'influence d'une cause bien distincte de mouvement.

Ceux qui nient l'existence de la force ainsi définie s'appuient sur une conception hypothétique de l'univers ; ils supposent que le monde matériel est constitué par les corps visibles et par des corps invisibles, animés de mouvements de translation et de rotation, et ils cherchent à montrer comment tous les phénomènes physiques résultent du choc mutuel de ces deux sortes de corps. Lorsque le mouvement d'un corps visible subit un changement, sans qu'on voie un échange de mouvement entre ce corps et un autre corps visible, on imagine un corps invisible capable de produire le même effet, et on croit avoir prouvé que la *force* n'existe pas. Mais alors, ou bien il faut appliquer à ces chocs invisibles les lois connues du choc des corps visibles, et dans ce cas on rencontre l'élasticité, c'est-à-dire la *force* elle-même, on recule seulement la difficulté ; ou bien il faut attribuer aux corps

invisibles des propriétés imaginaires qui n'appartiennent pas aux corps visibles, et l'on cesse de s'appuyer sur des faits pour s'abandonner aux conjectures les plus arbitraires.

Il n'appartient pas à la physique de résoudre le problème de l'essence de la force, de chercher si la force est le mouvement de la matière, ou un principe particulier. Sans doute la physique fournit des données utiles pour la solution de ce problème ; mais ces données sont insuffisantes, et c'est par la démonstration de ce dernier point que je terminerai cet ouvrage. Je m'estimerai heureux, si j'ai réussi à montrer clairement aux personnes qui ne cultivent pas particulièrement les sciences en quoi consiste la méthode expérimentale, quel est le but principal de la physique, et de quel secours elle peut être pour le philosophe qui recherche les principes des choses.

En étudiant les phénomènes physiques, nous considérons les corps comme des choses qui tombent sous nos sens. En réalité, ce sont des portions de l'espace dans lesquelles s'accomplissent des changements qui affectent nos organes directement ou indirectement, et les jugements que nous appelons lois physiques sont suggérés à notre esprit par les impressions que nos sens ont reçues. Mais nous laissons de côté, comme observateurs, le principe essentiel des corps. C'est à ce principe qu'on donne le nom de *matière*, et lorsqu'on emploie ce mot pour désigner les corps

eux-mêmes, on commet une confusion de langage.

Si la matière est un des principes de l'univers, il est bien évident qu'il n'est pas le seul. Il suffit de s'examiner soi-même et d'observer les êtres vivants pour se convaincre de l'existence d'autres principes qui sont absents dans les corps inanimés. La notion de l'âme est inséparable de celle de notre existence, et nos facultés morales dérivent d'un principe qui ne saurait être confondu avec la matière. Dès lors il serait absurde de vouloir séparer le monde physique et le monde moral dans la recherche des principes, puisqu'en nous ces principes sont dans une dépendance mutuelle. Il ne serait pas moins illogique de vouloir déduire la notion de l'un d'eux des connaissances acquises seulement par l'étude de l'autre. L'homme qui veut descendre de l'âme à la matière, ou inversement remonter de la matière à l'âme, tombera nécessairement dans l'erreur ; il lui faut mettre à profit toutes les connaissances dont il a été rendu capable par le Créateur pour essayer une synthèse des principes de l'univers. L'alliance des sciences naturelles et de la philosophie est le prélude indispensable de toute spéculation métaphysique, et c'est certainement faute d'une telle alliance que l'esprit humain est tombé souvent dans les plus funestes erreurs.

En observant l'être vivant, on ne tarde pas à reconnaître qu'un agent intermédiaire transmet la volonté aux organes, transmet les impressions à

l'âme. Les phénomènes de chaleur et d'électricité se rencontrent toujours entre la volition et l'acte, ou entre l'impulsion extérieure et la perception d'une sensation. Nous venons de voir que ces phénomènes supposent les forces calorique et électrique. Il semble donc que ces forces soient justement les agents intermédiaires dont nous nous servons.

En partant de remarques de ce genre, et en suivant une série de raisonnements, tantôt par induction, tantôt par déduction, M. Hirn est arrivé à regarder les forces comme des principes transcendants, analogues à ceux de l'âme et de la matière, c'est-à-dire non assujettis aux conditions de temps et d'espace ; c'est par l'intermédiaire de ces principes que notre âme serait mise en rapport avec le monde corporel. Il n'entre pas dans le plan de cet ouvrage de discuter le système philosophique de M. Hirn et de le comparer au système des échanges de mouvement qui est en grande faveur. Mais, qu'il me soit permis de le dire, en présence des doctrines diverses qui cherchent à se répandre, on éprouve une véritable consolation en lisant des pages souvent éloquentes, où l'on voit ce hardi penseur puiser ses iinspirations philosophiques aussi bien dans une conviction profonde des vérités de l'ordre moral, que dans une parfaite connaissance du monde physique.

A la fin de son ouvrage, M. Hirn exprime modestement l'espoir que ses idées existent déjà et ont

existé dans d'autres esprits, qu'il n'a fait qu'*accentuer plus fortement* ce que d'autres ont déjà pensé. « Si cet espoir si humble devait être déçu, dit-il en terminant, je détournerais tristement mes regards de mon livre, en me reprochant d'avoir ajouté quelques erreurs de plus à tant d'autres déjà surannées. » Non, les idées de M. Hirn ne sont pas au nombre de celles qui restent abandonnées, puis tombent dans l'oubli. Quelles que soient les objections qu'elles soulèvent, les controverses auxquelles elles peuvent donner lieu, de telles idées élèvent le niveau de l'esprit humain; elles lui font faire un pas de plus dans sa marche ascendante vers le créateur de toutes choses[1].

Septembre 1868.

[1] Depuis que ce livre a été livré à l'impression, M. Hirn a publié un nouvel ouvrage intitulé *Analyse élémentaire de l'univers*. Cet ouvrage développe plus complétement le système de métaphysique esquissé dans la 1re édition de l'*Exposition de la théorie mécanique de la chaleur et de ses conséquences philosophiques*. Nous avons eu aussi une édition française de l'*Unité des forces physiques* du R. P. Secchi. Le savant italien est un partisan convaincu de l'hypothèse dynamique. Pour lui la force n'est autre chose que le mouvement de la matière visible ou invisible ; c'est une propriété de la matière, et nullement, comme pour M. Hirn, un principe distinct.

TABLE DES GRAVURES

1. Expérience de Torricelli 5
2. Répulsion de deux aimants 7
3. Appareil de Cavendish 20
4. Expérience de M. Dupré 52
5. Expérience de capillarité 38
6. Absorption des gaz par les solides 39
7. Briquet à hydrogène 43
8. Ballons pour la diffusion des gaz 46
9. Expérience de Dutrochet 47
10. Appareil pour l'endosmose des gaz 51
11. Appareil pour la dissociation de l'eau 58
12. — — — de l'oxyde de carbone 61
13. Chaleur produite par la chute du mercure 72
14. Lampe philosophique 83
15. Appareil de Melloni 94
16. Réflexion d'une bille élastique sur un plan incliné 97
17. Miroirs conjugués 99
18. Réflexion du son 100
19. Lentille convergente 101
20. Lentille de Sondhaus pour la réfraction du son 101
21. Arc-en-ciel 121
22. Halo 127

23. Expériences d'interférences 130
24. Couleurs d'une bulle de savon. 131
25. Anneaux des lames minces. 134
26. Polarisation de la lumière par réflexion. 137
27. Anneaux de la lumière polarisée. 139
28. Attractions et répulsions électriques 145
29. Disques de verre pour l'électricité 147
30. Théorie de l'influence électrique. 149
31. Machine électrique de Nairne. 156
32. Invention de la bouteille de Leyde. 159
33. Batterie électrique. 161
34. Machine électrique de Holtz 165
35. Pile voltaïque. 171
36. Décomposition d'un sel par un courant voltaïque. 177
37. Calorimètre de Favre et Silbermann. 179
38. Répulsion de deux portions consécutives d'un courant voltaïque 184
39. Rotation continue d'un courant par un courant. 185
40. Solénoïdes 188
41. Induction faradaïque. 192
42. Paratonnerre.. 199
43. Fantôme magnétique. 202
44. Action mutuelle de deux aimants. 203
45. Expérience de l'aimant brisé. 205
46. Rotation d'un courant par un aimant. 207
47. Roue de Barlow. 208
48. Hélice magnétisante 214
49. Électro-aimant 215
50. Principe des machines magnéto-dynamiques. 221
51. Machine de Nollet. 223
52. Machine de Ladd. 227
53. Bobine de Siemens. 229
54. Appareil de Foucault. 232
55. Bobine de Ruhmkorff. 235
56. Appareil pour le diamagnatisme. 242
57. Pendule de Galilée. 254
58. Diapason. 272

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.

Philosophes et physiciens. — De la méthode expérimentale. — Lois physiques. — Métaphysique. 1

I. — LES CORPS ET LES FORCES.

I. Les trois états des corps. — Les molécules. 1
II. Impénétrabilité des corps. — Porosité. — Le vide barométrique. — La résistance magnétique. 3
III. Mobilité. — Inertie. — Force. 8
Nécessité de la vulgarisation des vérités scientifiques.

II. — L'ATTRACTION UNIVERSELLE.

I. Les lois de Galilée et de Képler. 11
II. La loi de Newton. 13
Sens général de cette loi. — Notions de la vitesse et de la masse. — Action et réaction.

III. Comment on pèse les corps célestes. 19
IV. Le poids des corps. 22
V. La transmission du travail. — La force vive. 25
VI. Caractères de la force newtonienne. 28

III. — L'ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

I. L'attraction mutuelle des molécules des gaz. 30
II. L'attraction mutuelle des molécules des liquides. . . . 32
Contractilité des liquides. — Nombre de molécules possible dans un volume donné d'eau.
III. L'attraction mutuelle des molécules des solides. — Cristallisation. 34
Phénomènes de surfusion. — Chaleur créée par la cristallisation. — Analogie de l'attraction moléculaire et de l'attraction universelle.
IV. Exemples divers d'attraction moléculaire. — Absorption des gaz par les solides. 37
Capillarité. — Absorption des gaz par le charbon. — Propriétés du platine. — Briquet à hydrogène.
V. La diffusion et l'endosmose. 43
Diffusion des liquides et des gaz. — Endosmose. — Osmose; son application industrielle. — Dialyse. — Expériences sur l'endosmose des gaz.
VI. L'affinité chimique. — Les atomes et les molécules. . . 53
Corps composés et corps simples. — Molécules physiques et chimiques. — Les molécules physiques sont figurables. — Chaleur créée par les combinaisons chimiques.
VII. La dissociation des corps composés. 58
Expériences de M. Henri Sainte-Claire Deville.
VIII. Analogie de l'attraction moléculaire et de la gravitation universelle. 65
Possibilité d'une force unique régissant les corps célestes, les molécules et les atomes.

IV. — LA CHALEUR.

I. Origine mécanique de la chaleur. 68

II. Équivalence de la chaleur et du travail mécaniques. — En quoi consiste le frottement. 70

Unité de chaleur ou calorie. — Principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur. — Chaleur produite par la chute d'un liquide. — Du frottement.

III. Équivalent mécanique de la chaleur. 76

Production du travail à l'aide de la chaleur; expériences de M. Hirn.

IV. L'attraction moléculaire dans l'eau. — La chaleur de combinaison. 80

On applique le principe précédent aux changements d'état des corps. — Travail extérieur et travail intérieur. — Sources de chaleur. — Lampe philosophique. — Caractère essentiel de la théorie mécanique de la chaleur.

V. Conservation de l'énergie. 86

La chaleur tend à se mettre en équilibre dans les corps. — Énergie. — Sa conservation.

VI. Comment la machine à vapeur produit du travail. . . 89

VII. Caractères de l'action calorifique. — Le rayonnement. . 92

Appareil de Melloni. — Analogie du rayonnement avec le choc des corps élastiques. — Miroirs conjugués. — Analogie du rayonnement avec la propagation du son.

VIII. La force calorique. 102

V. — LA LUMIÈRE.

I. Les corps lumineux. — La sensation lumineuse. . . . 104

II. Identité de la chaleur et de la lumière. 107

Phénomènes généraux que produisent les rayons solaires. — Réflexion, réfraction, dispersion; spectre solaire et calorifique. — Diversité des rayons solaires.

III. Transformations de l'énergie opérées par les rayons solaires. 118

IV. L'arc-en-ciel. 120

V. Les halos. 125

VI. Principe des interférences. — Merveilles d'une bulle de savon. 129

VII. La lumière polarisée. — Les merveilles d'un morceau de glace. 136

La structure des corps révélée par la lumière.

VI. — L'ÉLECTRICITÉ.

I. Ce qu'on entend par quantité d'électricité. 142

Franklin et Volta. — Force électique; unité d'électricité.

II. Les deux espèces d'électricité. 146

Corps conducteurs de l'électricité. — Isolement.

III. La polarité électrique. 149

IV. Le courant électrique. — Conversion de l'électricité en chaleur. 152

Étincelle électrique. — Tension électrique et courant.

V. Principes généraux pour servir à l'explication des phénomènes électriques. 155

Application à la machine de Nairne. — Conversion du travail mécanique en chaleur par l'intermédiaire de l'électricité.

VI. La batterie électrique. 158

Conservation temporaire de l'électricité. — Découverte de la bouteille de Leyde. Décharge d'une batterie.

VII. La machine de Holtz. 162

VIII. La pile de Volta. — Comment elle produit la chaleur, la lumière, les actions chimiques. 169

Les grands prix d'électricité, Davy et Ruhmkorff. — Conversion du travail chimique en chaleur dans le circuit vol-

taïque ; arc voltaïque. — Décompositions chimiques ; elles consomment une partie de la chaleur engendrée dans la pile. — Loi de Faraday sur les équivalents chimiques.

IX. L'œuvre d'Ampère. 183

Attractions, répulsions et rotations produites à l'aide du courant voltaïque. — Production du travail mécanique à l'aide du courant. — Solénoïdes. — Théorie électro-dynamique.

X. Les courants induits de Faraday. 191

Caractère de Faraday. — Induction faradaïque. — Relation entre l'induction et les actions électro-dynamiques. — Production de l'électricité par le travail mécanique.

XI. Du rôle de l'électricité en général. 196

Comparaison de l'électricité statique et de l'électricité dynamique. — Le paratonnerre.

VII. — LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

I. La polarité magnétique. 201

Pierre d'aimant. — Fantôme magnétique. — Propriétés principales des aimants.

II. Identité du magnétisme et de l'électricité. 206

Rotation d'un courant par un aimant. — Roue de Barlow. — Aimants et solénoïdes. — Théorie d'Ampère sur le magnétisme.

III. Aimantation du fer par un courant électrique. 212

Électro-aimants. — Télégraphie électrique.

IV. Les machines électro-magnétiques. 216

Comparaison de ces machines à la machine à vapeur.

V. Les courants magnéto-électriques. 220

La lumière électrique engendrée par le travail mécanique. — Machine de Nollet. — Machine de Ladd. — Expérience de de Foucault.

VI. La machine de Ruhmkorff. 234

VII. Le magnétisme et le diamagnétisme. 241

Caractères généraux de la force électrique.

VIII. — LES HYPOTHÈSES ET LES THÉORIES.

I. Résumé des notions acquises sur les forces. 247

II. La méthode expérimentale et les théories. 251

Galilée découvre les lois du pendule. — Comment on prouve que la cause de l'oscillation du pendule est la même que celle de la gravitation.

III. Les fluides impondérables. 257

L'esprit humain à la recherche des principes des choses. — Le fluide calorique. — Le fluide lumineux. — Le fluide électrique. — Le fluide magnétique.

IV. L'éther. — Les ondulations. 265

Le système de Descartes. — L'éther; les ondes liquides; les ondes sonores; les ondes lumineuses; les ondes calorifiques. — L'hypothèse de l'éther admet des forces qu'elle n'explique pas.

V. Danger et utilité des hypothèses. 276

Les hypothèses qui précèdent sont des symbolismes. — Théorie dynamique.

VI. Le problème de la force. 278

Sa solution ne peut reposer sur les théories physiques seulement. — Les échanges de mouvement et les principes transcendants de M. Hirn.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.